



**Ema Daniela Martins Barradas**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

## **Estudo da flexibilidade energética em edifícios através da inércia térmica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil – Perfil Construção**

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL

Júri

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová, FCT/UNL

Arguente: Professora Doutora Maria da Glória Gomes, IST

Vogal: Professor Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro, 2017**



### **Estudo da flexibilidade energética em edifícios através da inércia térmica**

‘Copyright’ Ema Daniela Martins Barradas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Os meus primeiros agradecimentos são dirigidos ao meu orientador Professor Doutor Daniel Aelenei que despertou o meu interesse sobre o tema. Agradeço o seu acompanhamento e a sua disponibilidade.

Aos meus pais deixo um agradecimento enorme pelo apoio contínuo e por me terem dado esta oportunidade, sem eles seria impossível a concretização dos meus objetivos.

Agradeço também ao Diogo pela sua paciência e por estar sempre ao meu lado.

Por fim, deixo um agradecimento especial aos meus amigos que me ajudaram e acompanharam neste percurso.



## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do potencial do armazenamento de energia térmica e a definição de estratégias para a exploração da flexibilidade energética na estrutura de edifícios residenciais, considerando o conforto térmico. O trabalho recorre à simulação com recurso ao *software EnergyPlus* para a modelação do comportamento térmico de um edifício de habitação, que adota diversas soluções construtivas em diversos contextos climáticos de Portugal durante a estação de aquecimento.

Esta dissertação define a flexibilidade energética de um edifício como a capacidade de desviar a energia elétrica de um perfil de consumo de referência (aquecimento), sem afetar o conforto térmico durante o processo, e pode ser gerida de modo a minimizar os custos do consumo do aquecimento. O potencial da flexibilidade energética dos edifícios estudados é testado com base nos valores da capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência do armazenamento na presença da alteração da temperatura de conforto e da autonomia do edifício relativamente ao aquecimento. Os valores obtidos permitem constatar que na solução construtiva com maior quantidade de isolamento térmico verifica não só menores necessidades de aquecimento, como também, menor quantidade de energia térmica armazenada na sua estrutura. No entanto, a libertação do calor da sua estrutura é lenta e deste modo, é a solução construtiva que mais autonomia apresenta relativamente ao aquecimento. Por outro lado, a eficiência diminui com o aumento da duração e da temperatura do aquecimento alterado. Deste modo, as melhores soluções de pré-aquecimento ocorrem durante curtos períodos de tempo (até 6 horas), e evitam elevadas perdas térmicas assim como não provocam o desconforto dos ocupantes.

Por fim, a capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência do armazenamento de calor na estrutura de edifícios são indicadores que permitem quantificar a flexibilidade energética em edifícios. Estes indicadores estão em função das propriedades térmicas do edifício, no entanto, também dependem dos equipamentos de climatização, dos requisitos de conforto, das condições atmosféricas e do comportamento dos ocupantes, por isso, não são constantes.

**Palavras-chave:** Flexibilidade energética; Inércia térmica; Armazenamento de calor; Aquecimento; Edifícios residenciais; EnergyPlus.





## Abstract

The present dissertation aims to study the potential of thermal energy storage and define strategies for exploring energy flexibility in a residential building structure, considering thermal comfort. This work uses simulation with the *software EnergyPlus* to model the thermal behavior of a residential building, which adopts several constructive solutions in different climatic contexts of Portugal in the heating season.

This dissertation defines a building's energy flexibility as an ability to divert electrical energy from a reference consumer profile (heating), without affecting thermal comfort during the process, and can be managed in a way that minimizes heating consumption. In this work, energy flexibility potential in buildings is tested based on the values of available structural storage capacity and storage efficiency due to changes to the comfort temperature and the building's autonomy to the heating. The results indicate that the constructive solution with more amount of thermal insulation, not only has lower heating needs, but also has the lowest amount of thermal energy stored in its structure. However, the release of heat from its structure is slow and thus, the building with greater amount of thermal insulation is the most autonomous in terms of heating. On the other hand, efficiency decreases with the increase of the duration and the temperature of the altered heating. Thus, the best preheating solutions occur for short periods of time (up to 6 hours), that avoid high thermal losses and doesn't cause discomfort to the occupants.

Finally, available structural storage capacity and heat storage efficiency are indicators that quantify energy flexibility in buildings. These indicators are in function of the thermal properties of the building, but also depend on the air conditioning equipment, comfort requirements, boundary conditions and the behavior of the occupants, so they are not constants.

**Keywords:** Energy flexibility; Thermal mass; Heat Storage; Heating; Residential buildings; EnergyPlus.



# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e Enquadramento do Tema .....	1
1.2. Objetivos e Metodologias .....	1
1.3. Estrutura e Plano da Dissertação .....	1
2. Flexibilidade Energética em Edifícios .....	3
2.1. Consumo de Energia nos Edifícios .....	3
2.1.1. Consumo de Energia no Sector Doméstico e de Serviços .....	4
2.1.2. Edifícios Energeticamente Sustentáveis .....	6
2.2. Estratégia Nacional e Europeia para Promover a Flexibilidade Energética .....	8
2.3. O Conceito de Flexibilidade Energética em Edifícios .....	9
2.3.1. A Importância da Inércia Térmica na Flexibilidade .....	10
2.4. Indicadores de Flexibilidade em Edifícios .....	11
3. Metodologia .....	15
3.1. Software EnergyPlus .....	15
3.1.1. Teste comparativo do Software EnergyPlus .....	15
3.1.1.1. Casos Simulados .....	15
3.1.1.2. Resultados dos Casos Simulados .....	21
3.1.1.3. Análise dos Resultados dos Casos Simulados .....	24
3.2. Descrição do Edifício em Estudo .....	24
3.2.1. Soluções Construtivos do Edifício em Estudo .....	25
3.2.2. Palas Horizontais e Inclinadas .....	29
3.2.3. Implementação do Edifício no <i>Software EnergyPlus</i> .....	31
3.3. Flexibilidade Energética no Edifício em Estudo .....	32
4. Análise de Resultados .....	35
4.1. Zona Climática de Lisboa .....	35
4.2. Zona Climática de Bragança .....	49
4.3. Zona Climática do Porto .....	56
4.4. Gestão da Energia Final de acordo com a Tarifa Energética .....	63
5. Conclusões .....	71
5.1. Desenvolvimentos futuros .....	72
Bibliografia .....	73
Anexo A – Eficiência do Armazenamento e Capacidade de Armazenamento Estrutural Disponível .....	75
Anexo B – Gestão da Energia Útil de acordo com a Tarifa Energética .....	77



## Índice Tabelas

Tabela 2.1 – Equipamentos para aquecimento de águas, aquecimento ambiente e arrefecimento (Fonte: BUILD-UP SKILLS, 2012).....	5
Tabela 3.1 – Construção das Paredes exteriores – Caso 600. ....	16
Tabela 3.2 – Construção da Cobertura – Caso 600. ....	16
Tabela 3.3 – Construção do Pavimento – Caso 600. ....	17
Tabela 3.4 – Campos de “WindowMaterial:Glazing” no <i>Software EnergyPlus</i> .....	17
Tabela 3.5 – Campos de “WindowMaterial:Gas” no <i>Software EnergyPlus</i> . ....	17
Tabela 3.6 – Campos de “Construction” no <i>Software EnergyPlus</i> . ....	17
Tabela 3.7 – Campos do <i>IDF Editor</i> do <i>Software EnergyPlus</i> .....	18
Tabela 3.8 – Construção das Paredes Exteriores – Caso 900. ....	20
Tabela 3.9 – Construção do Pavimento – Caso 900. ....	20
Tabela 3.10 – Resumo dos resultados das Series de Casos 600 simulados no <i>EnergyPlus</i> Versão 8.6.0.....	21
Tabela 3.11 – Resumo dos resultados das Series de Casos 900 simulados no <i>EnergyPlus</i> Versão 8.6.0.....	22
Tabela 3.12 – Solução Construtiva 1: Paredes Envolventes. ....	26
Tabela 3.13 – Solução Construtiva 1: Cobertura. ....	26
Tabela 3.14 – Solução Construtiva 2: Paredes Envolventes. ....	26
Tabela 3.15 – Solução Construtiva 2: Cobertura. ....	27
Tabela 3.16 – Solução Construtiva 3: Paredes Envolventes. ....	27
Tabela 3.17 – Solução Construtiva 3: Cobertura. ....	27
Tabela 3.18 – Solução Construtiva 4: Paredes Envolventes. ....	28
Tabela 3.19 – Solução Construtiva 4: Cobertura. ....	28
Tabela 3.20 – Solução Construtiva: Pavimento. ....	28
Tabela 3.21 – Solução Construtiva: Parede Interior. ....	29
Tabela 3.22 – Solução Construtiva: Vãos Envidraçados. ....	29
Tabela 3.23 – Dimensões das Palas Horizontais em Lisboa, Porto e Bragança. ....	31
Tabela 4.1 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento em Lisboa. ....	36
Tabela 4.2 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento em Bragança. ....	49
Tabela 4.3 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento no Porto. ....	56
Tabela 4.4 – Fator de flexibilidade para o dia 6 de fevereiro. ....	68
Tabela 4.5 – Fator de flexibilidade para o dia 7 de fevereiro. ....	68
Tabela 4.6 – Fator de flexibilidade otimizado para o dia 7 de fevereiro. ....	68
Tabela B.1 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, Parede Simples. ....	77
Tabela B.2 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 3 cm de EPS. ....	77
Tabela B.3 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 6 cm de EPS. ....	77
Tabela B.4 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 8 cm de EPS. ....	78



# Índice Figuras

Figura 2.1 – Evolução do Consumo de Energia Primária em Portugal (Fonte: DGEG, 2012) .....	3
Figura 2.2 – Consumo de Energia Final por Setor 2012 (Fonte: DGEG, 2012) .....	4
Figura 2.3 – Repartição do consumo de eletricidade pelos diferentes usos finais no setor doméstico (Fonte: DGEG/IP-3E, Eficiência energética em equipamentos e sistemas elétricos no setor residencial, 2004) .....	5
Figura 2.4 – Certificação Energética dos novos edifícios e dos edifícios existentes em Portugal (Fonte: ADENE, 2017) .....	6
Figura 2.5 – Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica em Portugal e uma casa Passivhaus (Fonte: Passivhaus, 2007) ....	7
Figura 2.6 – Gráfico da gestão da carga solicitada pelas bombas de calor e pelo carregamento de veículos elétricos (Fonte: IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings, 2016).....	10
Figura 2.7 – Gráfico da simulação experimental usada para quantificar a capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência do armazenamento (Fonte: A Generic Quantification Method for the Active Demand Response Potential of Structural Storage in Buildings, 2015).....	12
Figura 3.1 – Modelo Base: Caso 600 (Fonte: BESTEST, 2010) .....	16
Figura 3.2 – Modelo Base com Sombreamento: Caso 610 (Fonte: BESTEST, 2010).....	18
Figura 3.3 – Modelo Base com vãos envidraçados a Este/Oeste: Caso 620 (Fonte: BESTEST, 2010) .....	19
Figura 3.4 – Modelo Base com vãos envidraçados a Este/Oeste com sombreamento: Caso 630 (Fonte: BESTEST, 2010) .....	19
Figura 3.5 – Gráfico dos Resultados do Caso 600 - Construção Leve: Vãos Envidraçados a Sul .....	24
Figura 3.6 – Edifício em Estudo – Vista isométrica da esquina entre Sul e Oeste.....	25
Figura 3.7 – Edifício em Estudo – Vista isométrica da esquina entre Norte e Este .....	25
Figura 3.8 – Declinação $\delta$ (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016) .....	29
Figura 3.9 – Pala perpendicular a uma parede (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016) .....	30
Figura 3.10 - Exemplo de uma pala horizontal (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016) .....	30
Figura 3.11 – Exemplo da Modelação da temperatura interior.....	33
Figura 3.12 - Temperatura exterior dos distritos em estudo. ....	34
Figura 4.1 - Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento em Lisboa. ....	35
Figura 4.2 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Lisboa. ....	36
Figura 4.3 – Modelação da temperatura interior durante 6 horas a 24 °C: Parede Simples, Lisboa. ....	37
Figura 4.4 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Lisboa. ....	37
Figura 4.5 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede Simples, Lisboa. ....	38
Figura 4.6 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede Simples, Lisboa. ....	38
Figura 4.7 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 24 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa. ....	39

Figura 4.8 – Modelação da temperatura interior durante 4 horas a 22 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa.....	40
Figura 4.9 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa.....	40
Figura 4.10 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm EPS, Lisboa.....	41
Figura 4.11 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm EPS, Lisboa.....	41
Figura 4.12 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.....	42
Figura 4.13 – Modelação da temperatura interior durante 12 horas a 20 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.....	42
Figura 4.14 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.....	43
Figura 4.15 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 6 cm EPS, Lisboa.....	43
Figura 4.16 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 6 cm EPS, Lisboa.....	44
Figura 4.17 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	44
Figura 4.18 – Modelação da temperatura interior durante 6 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	45
Figura 4.19 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	45
Figura 4.20 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	46
Figura 4.21 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	46
Figura 4.22 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Lisboa.....	47
Figura 4.23 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Lisboa.....	48
Figura 4.24 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Lisboa.....	48
Figura 4.25 – Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento em Bragança.....	49
Figura 4.26 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Bragança.....	50
Figura 4.27 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Bragança.....	50
Figura 4.28 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Bragança.....	51
Figura 4.29 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Bragança.....	51
Figura 4.30 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Bragança.....	52
Figura 4.31 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede simples, Bragança.....	52
Figura 4.32 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Bragança.....	53
Figura 4.33 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Bragança.....	54
Figura 4.34 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Bragança.....	54



Figura 4.35 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Bragança. ....	55
Figura 4.36 – Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento no Porto. ....	56
Figura 4.37 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Porto. ....	57
Figura 4.38 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Porto. ....	57
Figura 4.39 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede simples, Porto. ....	58
Figura 4.40 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede simples, Porto.....	58
Figura 4.41 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Porto. ....	59
Figura 4.42 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Porto. ....	59
Figura 4.43 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Porto. ....	60
Figura 4.44 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Porto.....	60
Figura 4.45 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Porto. ....	61
Figura 4.46 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor no Porto. ....	62
Figura 4.47 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor no Porto. ....	62
Figura 4.48 – Energia para o aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	63
Figura 4.49 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	64
Figura 4.50 – Custo do aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	64
Figura 4.51 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 3 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.....	65
Figura 4.52 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 3 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	65
Figura 4.53 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 6 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.....	66
Figura 4.54 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 6 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	66
Figura 4.55 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 8 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.....	67
Figura 4.56 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 8 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança. ....	67
Figura A.1 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Bragança. ....	75
Figura A.2 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Bragança.....	75
Figura A.3 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Porto.....	76
Figura A.4 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Porto. ....	76



# Lista de Abreviaturas Siglas e Símbolos

## Acrónimos

ADENE – Agência para a Energia  
AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado  
BESTEST – Teste de Simulação Energética de Edifícios (*Building Energy Simulation TEST*)  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia  
EBC – Energia em Edifícios e Comunidades (*Energy in Buildings and Communities*)  
ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos  
EPS – Poliestireno Expandido  
ETICS – Sistema de Isolamento Térmico aplicado pelo Exterior (*External Thermal Insulation Composite Systems*)  
IEA – Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)  
SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios

## Simbologia

$C_{ADR}$  – Capacidade de armazenamento estrutural disponível [kWh]  
 $C_p$  – Calor Específico [J/(kg.K)]  
 $e$  – Espessura [m]  
 $Q_\delta$  – Capacidade de desviar a potência [W]  
 $R$  – Resistência Térmica [(m<sup>2</sup>.k)/W]  
 $R_T$  – Resistência Térmica Total (nas coberturas  $R_{asc}$ , referente ao Inverno,  $R_{des}$ , referente ao Verão) [(m<sup>2</sup>.k)/W]  
SOC – Estado de carga [-]  
 $U$  – Coeficiente de Transmissão Térmica (nas coberturas  $U_{asc}$ , referente ao Inverno,  $U_{des}$ , referente ao Verão) [W/(m<sup>2</sup>.K)]  
 $\theta_s$  – Ângulo zenital [°]  
 $\phi_p$  – Azimute da parede [°]  
 $\phi_s$  – Azimute do Sol [°]  
 $\lambda$  – Condutibilidade Térmica [W/(m.K)]  
 $\delta$  – Declinação [°]  
 $\eta_{ADR}$  – Eficiência do armazenamento [-]  
 $\lambda$  – Latitude [°]  
 $\rho$  – Massa Volúmica Aparente Seca [kg/m<sup>3</sup>]



# 1. Introdução

## 1.1. Motivação e Enquadramento do Tema

Devido à constante dependência das nações pela energia para o seu desenvolvimento, o consumo intensivo de energia tem despertado o interesse pelas energias renováveis, para prevenir a destruição do meio ambiente e a degradação da qualidade de vida.

Especificamente o setor elétrico foi responsável por cerca de 28% das emissões de CO<sub>2</sub> de 2007 dentro do setor da energia, de acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos [1], tornando urgente a implementação de soluções que minimizem o impacto ambiental, tais como a utilização de fontes renováveis e a utilização de combustíveis mais limpos. No entanto, as fontes de energia como o vento e a energia solar são instáveis, o que impossibilita a satisfação permanente das necessidades energéticas de um edifício. Desta forma, torna-se essencial a gestão da produção e do consumo de energia de forma a minimizar os efeitos causados pela falta de compatibilidade entre a produção e o consumo. Esta gestão pode ser conseguida através da introdução da flexibilidade energética, quer para energia proveniente de fontes renováveis de um edifício quer da energia da rede de distribuição.

A flexibilidade energética consiste na capacidade de gerir o consumo e a produção de energia de acordo com as condições climáticas do local, necessidades dos consumidores e requisitos da rede [2]. A Agência Internacional de Energia [3], defende que a gestão do consumo é uma solução promissora para a redução das emissões prejudiciais ao ambiente, com uma contribuição de 38%, contra os 17% proporcionados pela produção a partir de fontes renováveis.

Para alcançar a flexibilidade num edifício, é necessário o reforço da rede elétrica através da adição de sistemas de armazenamento de energia e/ou a gestão inteligente da rede elétrica [4]. Neste contexto, surge a possibilidade de edifícios armazenarem energia sob a forma de calor na sua estrutura através da inércia térmica. Isto é, a inércia térmica é a capacidade que os elementos construtivos de um edifício têm para acumular calor, de forma a impedir as variações de temperatura no seu interior [5].

Esta dissertação surge neste contexto e da necessidade de estudar a flexibilidade energética de edifícios de acordo com o armazenamento de calor através da inércia térmica. A flexibilidade energética de um edifício é definida neste trabalho como a capacidade de desviar a energia elétrica de um perfil de consumo de referência (aquecimento), sem afetar o conforto térmico durante o processo, e pode ser gerida de modo a minimizar os custos do consumo do aquecimento.

## 1.2. Objetivos e Metodologias

Esta dissertação tem como objetivo o estudo do potencial do armazenamento de energia sob a forma de calor na estrutura de um edifício de habitação através da inércia térmica, através da modelação de equipamentos de climatização com recurso ao *software EnergyPlus*, considerando o conforto térmico. O edifício em estudo adota diversas soluções construtivas em diversos contextos climáticos de Portugal durante a estação de aquecimento.

## 1.3. Estrutura e Plano da Dissertação

De forma a promover a compreensão dos resultados obtidos no presente trabalho, a dissertação inicia com um enquadramento teórico sobre o tema de acordo com a bibliografia consultada. Em seguida, é apresentada a metodologia adotada e o caso de estudo. Posteriormente, são analisados os resultados obtidos pelo *software*. E por fim, são enumeradas as conclusões.

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos que são descritos de seguida.

O primeiro capítulo, a introdução, ao qual insere-se este subcapítulo, tem a finalidade de enquadrar e a descrever os objetivos do tema.

O segundo capítulo, subdivide-se em quatro subcapítulos, quantifica o consumo de energia nos edifícios em Portugal, e enquadra teoricamente a flexibilidade energética nos edifícios.

O terceiro capítulo, a metodologia, está subdividido em três subcapítulos, introduz o *software* utilizado, o caso de estudo é descrito e as simulações são traçadas com diferentes cenários de armazenamento de energia térmica na sua estrutura.

No quarto capítulo, com quatro subcapítulos, os resultados obtidos são apresentados e analisados.

Finalmente, o quinto capítulo, apresenta as principais conclusões obtidas e avança com possíveis desenvolvimentos futuros considerados interessantes para aliar ao tema.

## 2. Flexibilidade Energética em Edifícios

Este segundo capítulo da dissertação tem como fim a descrição e a revisão do estudo feito à flexibilidade energética em edifícios.

Deste modo, numa primeira fase é descrita de forma sucinta a oferta de energia em Portugal no setor dos edifícios, para que fins são gastos essa energia, de que forma os edifícios são classificados de acordo com o seu desempenho energético e que possíveis soluções existentes podem ser aplicadas para que os consumos energéticos sejam reduzidos.

Na fase seguinte, são indicados os líderes do projeto de investigação e divulgação internacional da importância da flexibilidade energética nos edifícios e quais são os seus principais objetivos.

Posteriormente, define-se o conceito de flexibilidade energética em edifícios e os seus exemplos.

Depois segue a designação da inércia térmica e de que forma se relaciona com a flexibilidade energética.

Por fim, são descritos sinteticamente vários indicadores de flexibilidade existentes, que servem de ponto de partida para o desenvolvimento desta dissertação.

### 2.1. Consumo de Energia nos Edifícios

Segundo a DGEG [6], Direção Geral de Energia e Geologia, o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa e cerca de 30% para o caso de Portugal, e é utilizado para o aquecimento e arrefecimento dos espaços, aquecimento de água doméstica, ventilação e a iluminação dos edifícios e equipamentos utilizados pelos ocupantes. Em que 50% deste consumo pode ser reduzido com medidas adequadas de eficiência energética, que representa uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Uma vez que Portugal tem escassos recursos energéticos fósseis endógenos (como o petróleo, o carvão e o gás natural), existe uma elevada dependência energética do exterior (79,4% em 2012), sobretudo das importações de fontes primárias de origem fóssil.

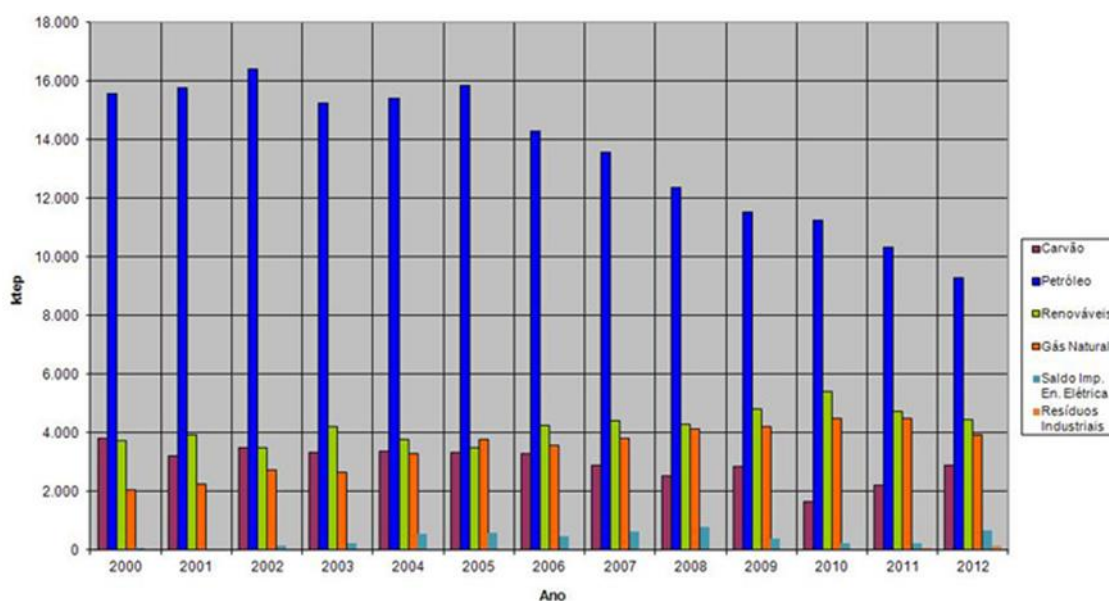


Figura 2.1 – Evolução do Consumo de Energia Primária em Portugal (Fonte: DGEG, 2012 [6])

Através da análise da Figura 2.1 constata-se que o petróleo é a energia primária mais consumida em Portugal, representando 43,3% do consumo total em 2012, contra 46,8% em

2011. O gás natural diminui a dependência exterior em relação ao petróleo assim como é o combustível fóssil com menor emissões de CO<sub>2</sub> durante a sua queima, e é a fonte mais sustentável de todas as não renováveis, e tem registado uma evolução positiva (15,1% em 2007 e 20,3% em 2011). Em 2012, representa 18,4% do total do consumo em energia primária devido à quebra do consumo desta fonte de energia para a produção de eletricidade. A fonte com maior impacto ambiental, o carvão, representa 13,6% do total do consumo de energia primária, em 2012. A DGEG prevê uma redução progressiva do peso de carvão na produção de eletricidade, apesar de nos dois últimos anos indicados na figura, ter aumentado o seu peso, devido à redução do preço do carvão nos mercados internacionais bem como do preço baixo das licenças de CO<sub>2</sub>. Em 2012 o contributo das energias renováveis no consumo total de energia primária foi de 20,8% que diminui face a 2011 que foi de 21,4%.

Resumindo, em 2012, cerca de 75,2% da energia primária consumida é proveniente de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão), e 20,8% de fontes renováveis, e os restantes 3,9% são provenientes dos resíduos industriais e da eletricidade importada. Deste modo, Portugal está dependente da energia exterior que provoca um impacto negativo não só na sua economia como também no ambiente. Neste contexto, a DGEG defende a necessidade de diversificar a estrutura da oferta de energia em Portugal através do aumento da contribuição das energias renováveis, nomeadamente: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa.

### 2.1.1. Consumo de Energia no Sector Doméstico e de Serviços

A Figura 2.2 apresenta a repartição do consumo energético em Portugal por setor em 2012, e através da análise da figura consta-se que o sector Doméstico (17%) e de Serviços (12%) representam 29% do consumo de energia.

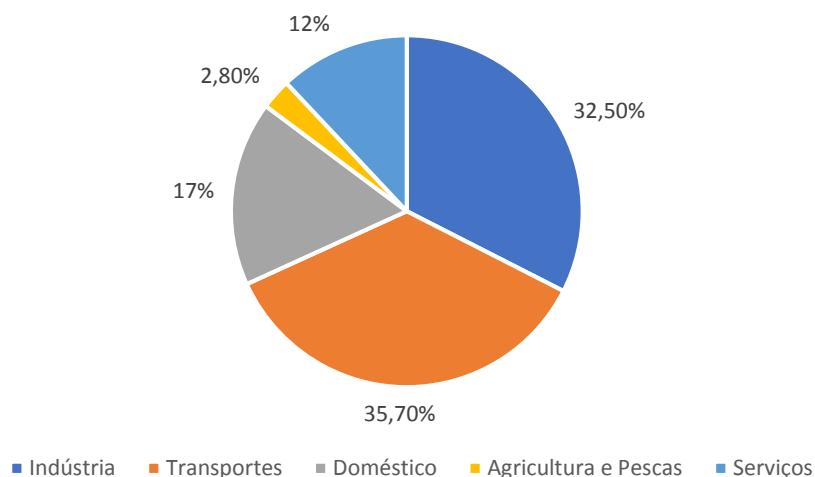


Figura 2.2 – Consumo de Energia Final por Setor 2012 (Fonte: DGEG, 2012 [6])

O consumo de energia no setor Doméstico tem diversos fins como apresenta a Figura 2.3. A análise da figura indica que os equipamentos de maior consumo energético são os frigoríficos, representando 22% do consumo de eletricidade final. Depois o aquecimento ambiente representa 15% e a iluminação 12%. A climatização (aquecimento com 15% e arrefecimento com 2%) representa 17% do consumo da eletricidade.



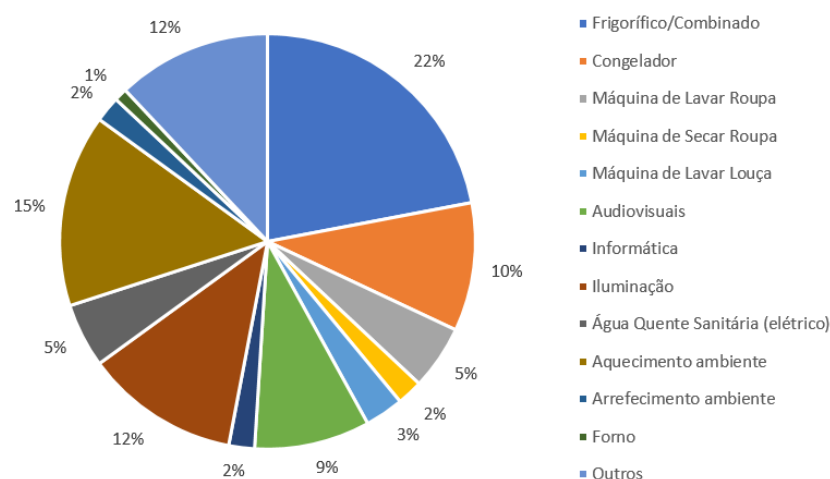


Figura 2.3 – Repartição do consumo de eletricidade pelos diferentes usos finais no setor doméstico (Fonte: DGEG/IP-3E, Eficiência energética em equipamentos e sistemas elétricos no setor residencial, 2004 [6])

Tabela 2.1 – Equipamentos para aquecimento de águas, aquecimento ambiente e arrefecimento (Fonte: BUILD-UP SKILLS, 2012 [7])

Equipamento	Alojamentos nº	%	Nº de equipamentos	Equipamentos por alojamento
<b>Aquecimento de águas</b>				
Esquentador	2 995 810	78,6	3 051 993	0,8
Termoacumulador	426 751	11,2	439 724	0,1
Caldeira	455 406	11,9	458 817	0,1
Sistema solar térmico	68 824	1,8	68 824	0,0
<b>Aquecimento ambiente</b>				
Lareira aberta	740 264	24,0	766 581	0,2
Lareira com recuperador de calor	340 498	11,1	346 204	0,1
Salamandra (lenha)	222 856	7,2	226 138	0,1
Caldeira para aquecimento central por circulação de água	323 520	10,5	340 904	0,1
Aquecedor elétrico independente	1 884 850	61,2	2 794 054	0,7
Aquecedor a GPL independente	218 293	7,1	237 589	0,1
Ar condicionado (Bomba de calor)	223 429	7,3	402 664	0,1
<b>Arrefecimento ambiente</b>				
Aparelho individual de ar condicionado	64 099	7,2	76 435	0,0
Ventilador (ventoinha, ventilador de parede)	615 128	69,5	756 108	0,2
Ar condicionado (Bomba de calor)	230 063	26,0	399 432	0,1

No geral, os consumidores em Portugal optam por soluções de aquecimento e arrefecimento ambiente de acordo com o fator preço, não havendo uma perspetiva de investimento de médio prazo nem a sustentabilidade como prioridade [7]. Uma vez que os portugueses escolhem um equipamento que, naquele momento e de forma mais económica, resolve ou ajuda a minimizar o problema. Como é possível de comprovar através da análise dos valores obtidos no inquérito realizado para o projeto BUILD-UP SKILLS [7], apresentado na Tabela 2.1, em que os consumidores preferem o uso de aquecedores elétricos independentes e ventoinhas para o arrefecimento ambiente.

### 2.1.2. Edifícios Energeticamente Sustentáveis

No contexto de promover um conjunto de medidas para melhorar o desempenho energético e as condições de conforto dos edifícios, surge a Diretiva nº 2002/91/CE, posteriormente revista pela Diretiva 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios, e que estabelece que todos os Estados-Membros devem implementar um sistema de certificação energética [8].

O Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) [8] implementado em Portugal, tem o objetivo de apresentar um conjunto de informações acerca do desempenho energético dos edifícios (através de uma classificação), assim como contempla as suas emissões de CO<sub>2</sub>, um conjunto de medidas de melhoria a fim de promover a eficiência energética, o conforto e a redução dos consumos de energia. A classificação do edifício segue uma escala de A+, A, B, B-, C, D, E e F, em que a classe A+ corresponde a um edifício com melhor desempenho energético, e a classe F corresponde a um edifício de pior desempenho energético. Os edifícios novos, com pedido de licença de construção após entrada em vigor do SCE, têm classes energéticas entre A+ e B-, sendo a classe B- o limite inferior a que estes edifícios estão sujeitos e as grandes intervenções têm classe energética mínima de C. Enquanto que os edifícios existentes poderão apresentar qualquer classe.



Figura 2.4 – Certificação Energética dos novos edifícios e dos edifícios existentes em Portugal (Fonte: ADENE, 2017 [8])

A ADENE [8], Agência para a Energia, indica que a média das classes energéticas dos edifícios residenciais aponta para “C”, como indica a Figura 2.4. Deste modo, é normal que na base de dados da Estatística do Rendimento e das Condições de Vida na União Europeia (EU-

SILC) [9], indicar que 30% da população portuguesa admite que não consegue manter as suas habitações com condições mínimas de conforto térmico.

A análise da Figura 2.4 complementada com informações da ADENE indica que os Certificados Energéticos dos imóveis existentes de habitação e serviços (40.000 e 460 imóveis certificados respetivamente) com a classe A e A+ têm nomeadamente a seguinte repartição 18.675 e 392, aproximadamente 5% e 1% da escala completa de classes energéticas dentro das duas categorias. O nível de eficiência energética nos edifícios existentes é baixo, quando comparado com os dos edifícios novos. No entanto, segundo a ADENE, os edifícios existentes possuem um elevado potencial de aumento de eficiência energética após a sua reabilitação.

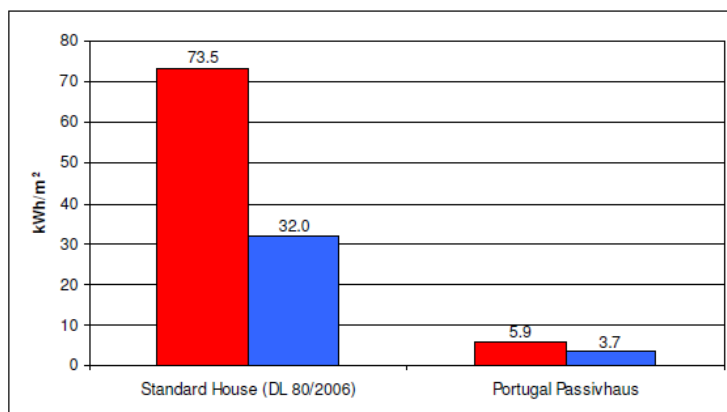


Figura 2.5 – Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica em Portugal e uma casa Passivhaus (Fonte: Passivhaus, 2007 [10])

Desta forma, é com o recurso a sistemas passivos, complementados com sistemas ativos adequados, como indica a Norma *Passivhaus* aplicada a Portugal [10], que os consumos energéticos são significativamente reduzidos. A análise da Figura 2.5 indica que em Portugal os edifícios possuem capacidade de reduzir cerca de 90% das necessidades energéticas referentes aos equipamentos de climatização.

A orientação de um edifício é uma medida passiva eficaz para aumentar o seu desempenho energético, segundo Tirone e Nunes [11], um edifício que aproveita ao máximo a energia solar pode contribuir para a diminuição do consumo de energia em 20%, no entanto, esta medida está condicionada pelos planos de urbanização. Desta forma, sempre que é possível uma orientação adequada, existem maiores ganhos solares no Inverno, que diminuem as necessidades de aquecimento, e no Verão, o aumento da temperatura interior é controlada através do sombreamento adequado. Por outro lado, a adequada solução construtiva das envolventes do edifício (fachadas, cobertura, caixilharias e vãos envidraçados) complementada por uma ventilação natural, reduz significativamente as perdas de calor.

Por vezes um adequado projeto passivo não é o suficiente para garantir o conforto térmico dos moradores, pode ser necessário complementar o edifício com alguns meios ativos, tal como a climatização ambiente que por sua vez pode recorrer a energias renováveis que reduzem o impacto ambiental do edifício. No entanto, as energias renováveis podem afetar a estabilidade da rede elétrica uma vez que a energia produzida por estas não é constante e é necessário controlar a energia consumida para igualar à energia produzida [1].

Na sequência deste subcapítulo conclui-se que há necessidade de gerir a energia dos edifícios de forma a promover a sustentabilidade. Desta forma introduz-se a flexibilidade energética como uma medida capaz de concretizar a gestão eficiente da energia.

## 2.2. Estratégia Nacional e Europeia para Promover a Flexibilidade Energética

O programa Energia em Edifícios e Comunidades (EBC) [12], criado em 1997 pela Agência Internacional de Energia (AIE), conta com 26 países membros, incluindo Portugal, que promovem projetos colaborativos internacionais, focados na investigação e divulgação internacional da importância da eficiência energética nos edifícios.

A EBC tem como objetivos o aumento do conhecimento, a identificação dos aspetos críticos e a obtenção de possíveis soluções no que respeita à flexibilidade energética em edifícios. Este programa está a desenvolver e simplificar a integração de tecnologias e processos orientados para a eficiência energética através de diversos temas, nomeadamente:

- Projeto integrado de planeamento e construção
- Sistemas energéticos dos edifícios, incluindo o uso de energias renováveis
- Envolvente construtiva eficiente
- Métodos de gestão e monitorização de consumos de energia em comunidades
- Métodos de quantificação, previsão e gestão dos consumos reais de energia nos edifícios

Deste modo, o programa pretende a investigação e desenvolvimento (I&D) de edifícios com emissões de carbono e consumos energéticos quase-zero, assim como o desenvolvimento de políticas e metodologias de gestão de energia ao nível de cidades e comunidades. Os resultados obtidos nos projetos da EBC, permitem a formulação de políticas e legislação nacional e internacional de conservação de energia dos seus países membros.

Jensen *et al.*[2] indicam que apesar dos vários estudos realizados no contexto da integração de uma grelha elétrica inteligente nos edifícios, de forma a beneficiar das vantagens da flexibilidade energética, a aplicação desta estratégia ainda não é possível de prever, uma vez que o conceito em si ainda está em fase inicial de desenvolvimento. As investigações têm ocorrido com objetivo de realizar comandos simples, como ligar e desligar, e não em como otimizar a flexibilidade energética de edifícios.

Uma vez que o conceito de flexibilidade energética em edifícios necessita de ser desenvolvida, foi criado o IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings [2], para responder a questões como, qual é a quantidade de flexibilidade energética que cada edifício com diferentes características e fins de utilização podem oferecer aos futuros sistemas de energia. De modo a facilitar o futuro da flexibilidade energética em edifícios, o Annex 67 tem como objetivos:

- Desenvolvimento da terminologia e definição de “Flexibilidade Energética nos edifícios” e métodos de classificação
- Investigação do conforto do utilizador, motivação e aceitação associada com a introdução da Flexibilidade Energética nos edifícios
- Investigação da Flexibilidade Energética e o potencial em diferentes edifícios e contextos, e desenvolvimento de um manual para o design, estratégias de controlo e algoritmos
- Investigação da Flexibilidade Energética de um grupo de edifícios e o efeito potencial de grelhas energéticas
- Demonstração da Flexibilidade Energética em edifícios através de estudos experimentais e em campo

As tecnologias que o Annex 67 pretende desenvolver com fim de promover a flexibilidade energética nos edifícios, será focada no armazenamento de energia térmica na estrutura de edifícios assim como em tanques de água doméstica, o controlo dos sistemas AVAC e também na redução do desfasamento entre a produção proveniente de sistemas de energias renováveis e o consumo.

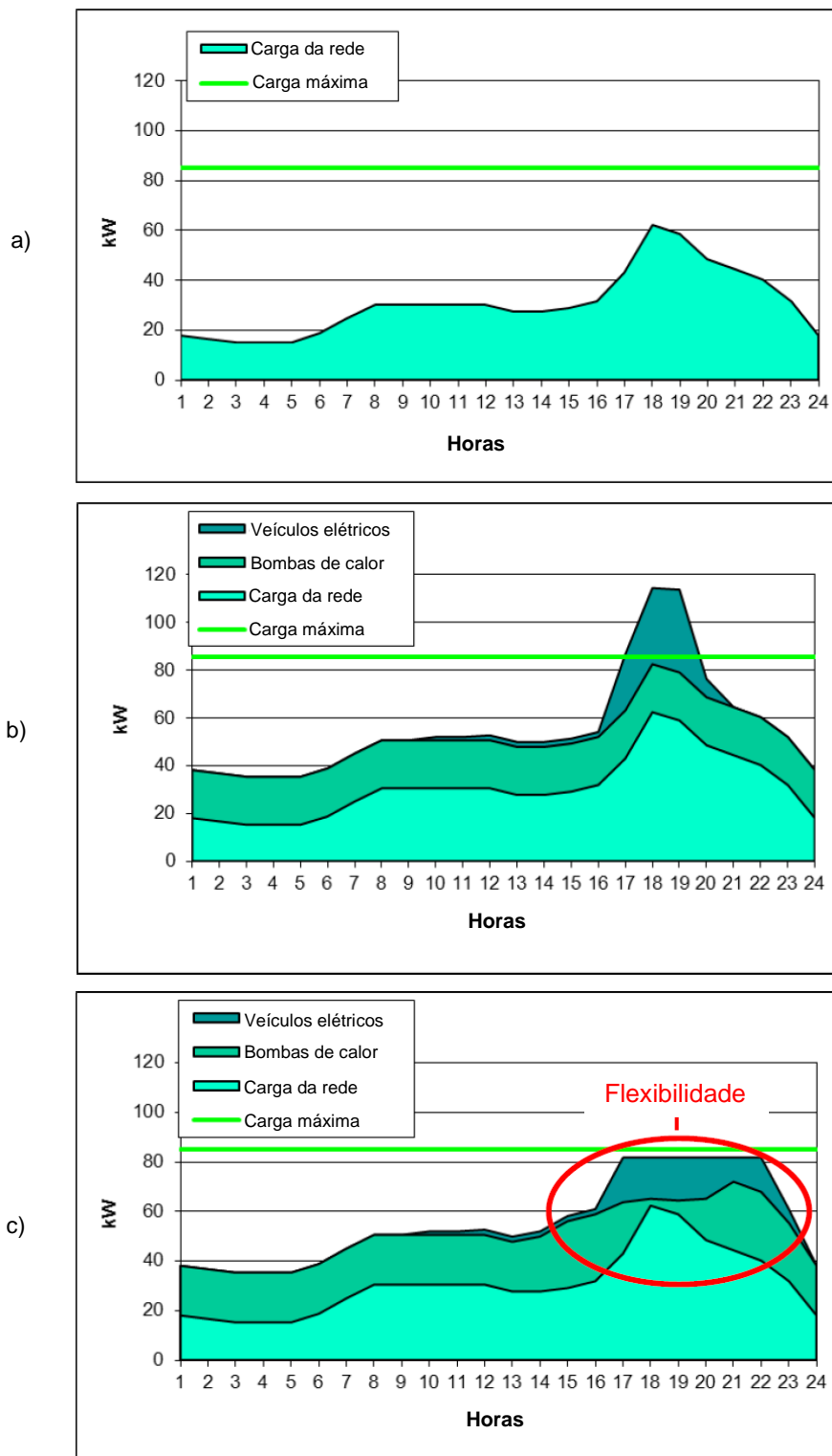
### 2.3. O Conceito de Flexibilidade Energética em Edifícios

O projeto LINEAR [13], define a flexibilidade como o maior intervalo de tempo que uma dada quantidade de energia solicitada pode ser atrasada ou antecipada durante um dia. Por outras palavras, a flexibilidade energética consiste na gestão temporal do consumo e da produção de energia e depende das condições climáticas do local, das necessidades do consumidor e dos requisitos da rede [2]. Para obter flexibilidade energética é necessário desviar no tempo a energia solicitada por um edifício. Existem cargas que podem ser controladas e desviadas no tempo, tais como a energia elétrica solicitada pelos equipamentos de climatização ambiente, ventilação, aquecimento de água doméstica e equipamentos domésticos tais como máquinas de lavar ou secar.

A Figura 2.6 ilustra um exemplo da aplicação prática da flexibilidade energética de um edifício através da gestão temporal de bombas de calor e do carregamento de veículos elétricos.

A análise da Figura 2.6 indica em a) a carga elétrica solicitada no edifício ao longo de um dia. Em b), são introduzidas as cargas das bombas de calor e do carregamento de veículos elétricos que excedem a carga máxima da rede entre as 17:00 e as 20:00 horas. Por fim, em c), é feita a gestão temporal da carga das bombas de calor e da carga necessária para o carregamento de veículos elétricos. Consta-se que é efetuado um pré-aquecimento excessivo do edifício, dentro da temperatura de conforto, antes da hora de pico da carga solicitada. E, após o pico da carga, é fornecido aquecimento extra para manter a temperatura de conforto mínima. O carregamento dos veículos é repartido durante um intervalo de tempo maior de modo a não ultrapassar a carga máxima da rede nas horas de pico.

No entanto, existem cargas que não podem ser desviadas, por exemplo, os sistemas audiovisuais e iluminação, uma vez que dependem do uso do utilizador. E os frigoríficos e os sistemas de alarme necessitam de um fornecimento de energia contínuo. Deste modo, sempre que as cargas têm capacidade de armazenamento de energia em que o consumo não é imediato à utilização, como no caso dos termoacumuladores, ou quando as cargas possibilitam a gestão temporal da sua utilização, sem colocar em causa a qualidade do serviço prestado, como no caso das máquinas de lavar e secar, são cargas que viabilizam a flexibilidade energética sem influenciar demasiado o conforto e a rotina dos ocupantes.



### 2.3.1. A Importância da Inércia Térmica na Flexibilidade

A inércia térmica presente na construção de um edifício é definida por Rodrigues *et al.* [14], como sendo a capacidade de um elemento armazenar calor e de só o libertar ao fim de certo tempo, o que é benéfico para o clima em Portugal que está sujeito a grandes amplitudes térmicas diárias. De acordo com Jensen *et al.* [2], a eficácia do armazenamento de energia

depende da quantidade, distribuição e das propriedades dos materiais de construção, e através destes fatores, é possível definir as medidas de parametrização das cargas de aquecimento e arrefecimento para um determinado período de tempo sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes. E se o edifício for aquecido ou arrefecido excessivamente dentro das temperaturas de conforto, é possível prolongar o período em que os sistemas de aquecimento e arrefecimento estão desligados. A dependência de um edifício face aos aparelhos de climatização depende da inércia térmica assim como das perdas de calor para o exterior (através de vãos exteriores, pontes térmicas entre outros fatores), ganhos internos (através dos ocupantes e equipamentos domésticos), os costumes dos ocupantes e as condições climatéricas em geral.

Uma vez que a inércia térmica permite a estabilização das temperaturas interiores relativamente às oscilações térmicas exteriores [14], significa que na estação de aquecimento (Inverno), o calor proveniente dos ganhos solares é armazenado nos paramentos e libertado à noite. Enquanto que na estação de arrefecimento (Verão), a inércia térmica anula o aumento da temperatura interior e à noite o calor acumulado é removido através de uma ventilação adequada. Deste modo, a inércia térmica permite uma regularização da temperatura interior e uma utilização mais eficiente da energia, pelo que deve ser fundamental na construção em Portugal.

Assim sendo, esta grandeza depende da massa dos elementos e é fundamental que os paramentos pesados não sejam isolados pelo interior com um material com baixa condutibilidade térmica, uma vez que anula a capacidade que essa parede tem de absorver energia. Deste modo, a localização ideal do isolamento térmico é na face em contacto com o exterior de uma parede. Como no caso dos ETICS (Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior), de acordo com Rodrigues *et al.* [14], que contribuem para o aumento da inércia térmica da parede, ao contrário do isolamento pelo interior que a anula, ou da solução mais comum em Portugal, parede de pano duplo com isolamento térmico na caixa de ar, em que só metade do paramento contribui para esta grandeza.

Os edifícios oferecem diferentes potenciais de armazenamento quer na estrutura, quer em unidades individuais que também contribuem com o aumento da flexibilidade energética de um edifício, tais como tanques de água quente e aquecedores que armazenam calor, no entanto, estes meios não fazem parte do objeto de estudo do presente trabalho.

## **2.4. Indicadores de Flexibilidade em Edifícios**

A flexibilidade energética em edifícios é sugerida como um meio de transição para um mercado de energia sustentável de acordo com a Agência Internacional de Energia [3], uma vez que a gestão do consumo de energia provoca a redução das emissões prejudiciais ao ambiente em 38%.

No entanto, há necessidade de quantificar genericamente o potencial de cada edifício quanto à sua capacidade de gerir energia. Reynder *et al.* [15] propõem quatro indicadores da flexibilidade energética em edifícios: capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ); eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ); capacidade de desviar a potência ( $Q_{\delta}$ ); e estado de carga (SOC). Estes indicadores são provenientes de simulações energéticas em edifícios onde a energia elétrica consumida no aquecimento de espaços interiores é desviada do seu perfil de consumo de referência, sem afetar o conforto térmico durante o processo. Apresenta-se a título ilustrativo na Figura 2.7 o exemplo de um edifício simulado onde existe um intervalo de tempo em que a temperatura de referência é alterada, neste caso é aumentada, de modo a ativar a inércia térmica. Assumindo que a temperatura de referência é a temperatura que garante o conforto térmico mínimo no interior do edifício.

Os indicadores propostos por Reynder *et al.*[15] não consideram a qualidade do isolamento térmico e as perdas de calor por infiltração e a energia fornecida pelo equipamento de climatização corresponde à energia térmica útil.

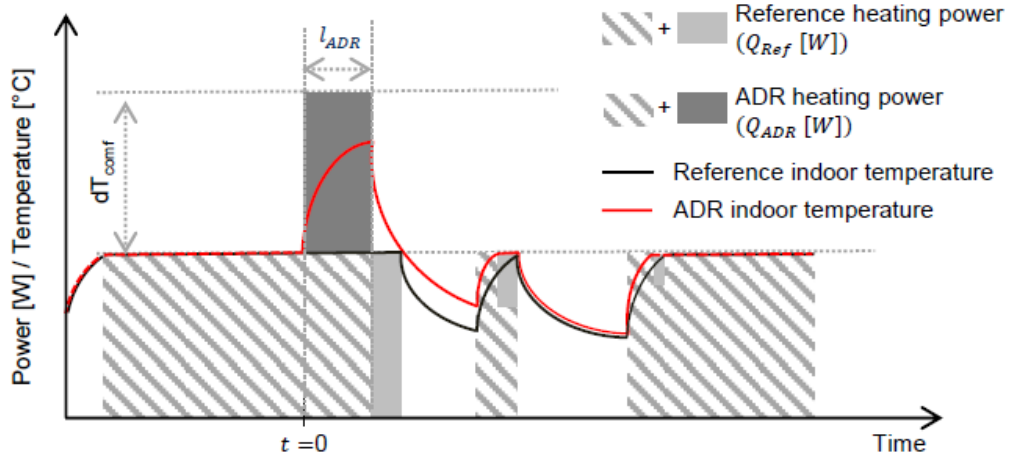


Figura 2.7 – Gráfico da simulação experimental usada para quantificar a capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência do armazenamento (Fonte: A Generic Quantification Method for the Active Demand Response Potencial of Structural Storage in Buildings, 2015 [15])

A capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$  [kWh]), é definida como a quantidade de calor que pode ser armazenada na estrutura do edifício através da inércia térmica, no intervalo de tempo da alteração da temperatura de referência, garantindo o conforto térmico. Para quantificar a capacidade de armazenamento estrutural, é necessário que o edifício esteja inicialmente com a temperatura mínima de conforto (temperatura de referência) e durante um certo intervalo de tempo  $l_{ADR}$  [s] aumentar a temperatura de aquecimento em  $dT_{comf}$  [°C]. Assim, a capacidade de armazenamento estrutural disponível é dada pelo integral, representado pela área a cinzento escuro na Figura 2.7, da diferença entre a potência de aquecimento durante o intervalo de alteração da temperatura de referência ( $Q_{ADR}$  [W]) e a potência de aquecimento na operação normal ( $Q_{Ref}$  [W]), isto é, com a temperatura de conforto mínima:

$$C_{ADR} = \int_0^{l_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt \quad (2.1)$$

A eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$  [-]) é definida como a fração de calor que é armazenada durante o intervalo de alteração da temperatura de referência, que pode ser utilizado para reduzir a potência do aquecimento necessário para manter a temperatura de conforto:

$$\eta_{ADR} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt}{\int_0^{l_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt} \quad (2.2)$$

O integral do denominador é igual à capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ). O numerador representa a quantidade de energia que não é recuperada após um longo período de tempo depois do aumento da temperatura de referência.

A capacidade de desviar a potência ( $Q_{\delta}$  [W]) é a relação entre a mudança da potência de aquecimento e a duração que esta mudança é mantida antes que o conforto térmico seja comprometido. E é dado pela diferença entre a potência de aquecimento durante o aumento da temperatura de referência ( $Q_{ADR}$  [W]) e a potência de aquecimento de referência ( $Q_{Ref}$  [W]):



$$Q\delta = Q_{ADR} - Q_{Ref} \quad (2.3)$$

O estado de carga (SOC) é utilizado para explicar a fração de energia armazenada no tempo  $t$  comparado com o total da capacidade de armazenamento:

$$SOC = \frac{E_{th}(t) - E_{th,min}(t)}{E_{th,max}(t) - E_{th,min}(t)} \quad (2.4)$$

Em que  $E_{th,max}$  e  $E_{th,min}$  representam o máximo e o mínimo conteúdo energético que é obtido quando o edifício é constantemente aquecido até à temperatura máxima de conforto e temperatura mínima de conforto respetivamente.

Para finalizar, tem-se o fator de flexibilidade proposto por Le Dréau *et al.* [4] . Assim, quando há necessidade de desviar energia utilizada durante períodos de preço elevado para períodos de preço baixo, utiliza-se o seguinte fator:

$$Flexibility\ factor = \frac{\int_{low\ price\ time} (q_{heating})dt - \int_{high\ price\ time} (q_{heating})dt}{\int_{low\ price\ time} (q_{heating})dt + \int_{high\ price\ time} (q_{heating})dt} \quad (2.5)$$

Onde o numerador é dado pela diferença entre o somatório da energia gasta em aquecimento durante o período de preço baixo e o somatório do aquecimento durante o período de preço elevado. O denominador, é dado pela soma da energia gasta quer em períodos de preço baixo quer em períodos de preço alto. Se o aquecimento utilizado é idêntico em períodos de preço baixo e alto, o fator é 0. Se o aquecimento não é utilizado em períodos de preço baixo, o fator é de -1. E se o aquecimento não é utilizado em períodos de preço elevado, o fator é de 1.



### 3. Metodologia

Neste capítulo a metodologia utilizada nesta dissertação é traçada. Desta forma, inicia-se com um subcapítulo sobre o *software* utilizado e a sua validação.

De seguida, o edifício e as soluções construtivas consideradas nas simulações deste trabalho são indicadas.

Por fim, os casos simulados são descritos.

#### 3.1. Software EnergyPlus

O edifício em estudo e os seus respetivos equipamentos e ocupantes é simulado com recurso ao *software EnergyPlus*, uma vez que é um instrumento de simulação de energia em edifícios amplamente validado [16]. Trata-se de um programa criado pelo departamento de energia dos Estados Unidos que calcula as cargas de aquecimento e de arrefecimento de um edifício, permitindo a introdução de vários parâmetros e de condições de utilização do edifício [17]. Na simulação, o programa assume que dentro de uma zona não existem diferenciais de temperatura, os elementos de uma superfície estão à mesma temperatura, a condução de calor é unidirecional e a emissividade das superfícies é igual para todos os comprimentos de onda.

##### 3.1.1. Teste comparativo do Software EnergyPlus

A IEA define três métodos possíveis para a validação deste tipo de softwares:

- Validação Analítica: compara os resultados do software com uma solução analítica conhecida;
- Validação Empírica: compara os resultados do software com os dados monitorizados de um edifício real ou um ensaio em laboratório;
- Teste comparativo: compara os resultados do software entre si ou com os resultados de outros programas de simulação.

O BESTEST (Building Energy Simulation TEST)[18] é um método padrão comparativo de testes de avaliação da precisão e fiabilidade de um software de simulação de energia em edifícios, usado pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) na norma norte americana ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 (Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs).

O BESTEST é constituído por 18 series de testes com origem num modelo base (Caso 600) e diferem nas seguintes características:

- Método construtivo das paredes envolventes e pavimento (construção leve ou pesada);
- Existência ou não de vãos envidraçados e a sua orientação;
- Elementos de sombreamento;
- Ativação de equipamentos de aquecimento e arrefecimento;
- Existência ou não de ventilação noturna.

Os resultados das necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais, a energia máxima e mínima de aquecimento e arrefecimento, assim como temperaturas máximas e mínimas no interior da fração autónoma sem equipamentos mecânicos ativados são comparadas com outros 8 programas de simulação energética que participaram no projeto da IEA [18].

##### 3.1.1.1. Casos Simulados

De modo a validar as simulações realizadas nesta dissertação, alguns resultados experimentais disponíveis pelo BESTEST são testados. Escolheu-se os casos que mais se

identificam com os ensaios simulados neste trabalho e a sua numeração está de acordo com o BESTEST.

### Caso 600 – Modelo Base com Edifício de Construção Leve

O Caso 600 é constituído por um edifício retangular com uma única zona, 8 m de largura, 6 m de comprimento e 2,7 m de altura, sem paredes interiores e com 12 m<sup>2</sup> de vãos envidraçados na exposição sul, a 0,2m do pavimento, como ilustra a Figura 3.1. As características da construção do edifício encontram-se apresentadas na Tabela 3.1, na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 (Cp – calor específico, e – espessura, R – resistência térmica, U – coeficiente de transmissão térmica,  $\lambda$  – Condutibilidade Térmica,  $\rho$  – Massa Volúmica Aparente Seca).

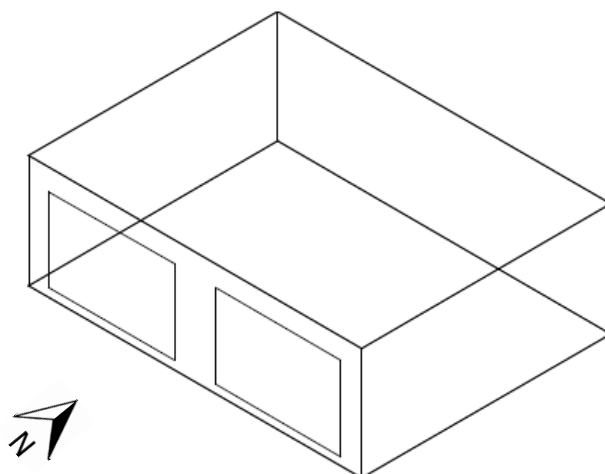


Figura 3.1 – Modelo Base: Caso 600 (Fonte: BESTEST, 2010 [18])

Tabela 3.1 – Construção das Paredes exteriores – Caso 600.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.K)]	R [(m <sup>2</sup> .k)/W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Placa de Madeira	0,009	0,140	0,064	15,556	530	900
Lã de vidro	0,066	0,040	1,650	0,606	12	840
Placa de Gesso Cartonado	0,012	0,160	0,075	13,333	950	840

Tabela 3.2 – Construção da Cobertura – Caso 600.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.K)]	R [(m <sup>2</sup> .k)/W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Deck	0,019	0,140	0,136	7,368	530	900
Lã de vidro	0,1118	0,040	2,794	0,358	12	840
Placa de Gesso Cartonado	0,010	0,160	0,063	16,000	950	840

Tabela 3.3 – Construção do Pavimento – Caso 600.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.K)]	R [(m <sup>2</sup> .k)/W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Isolamento Térmico	1,003	0,040	25,075	0,040	-	-
Soalho	0,025	0,140	0,179	5,600	650	1200

Os vãos envidraçados são constituídos por vidros duplos, cada vidro com 3 mm de espessura, divididos por um espaço de ar de 13 mm. As restantes propriedades encontram-se na Tabela 3.4, na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6 onde estão indicados os valores específicos dos campos de “WindowMaterial:Glazing”, “WindowMaterial:Gas” e “Construction” respetivamente, no *Software EnergyPlus*.

Tabela 3.4 – Campos de “WindowMaterial:Glazing” no *Software EnergyPlus*.

Campo	Valor
Name	Glass Type 1
Optical Data Type	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name	-
Thickness {m}	0,003175
Solar Transmittance at Normal Incidence	0,86156
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence	0,07846
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence	0,07846
Visible Transmittance at Normal Incidence	0,91325
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0,08200
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence	0,08200
Infrared Transmittance at Normal Incidence	0,0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity	0,84
Conductivity {W/m.K}	1,06

Tabela 3.5 – Campos de “WindowMaterial:Gas” no *Software EnergyPlus*.

Campo	Valor
Name	Air Space Resistance
Gas Type	AIR
Thickness {m}	0,013

Tabela 3.6 – Campos de “Construction” no *Software EnergyPlus*.

Campo	Valor
Name	Double Pane Window
Outside Layer	Glass Type 1
Layer 2	Air Space Resistance
Layer 3	Glass Type 1

As especificações do caso 600 são as seguintes:

- Localização: cidade de Denver no Estado de Colorado, USA;

- Taxa de renovação de ar por infiltração: 0,5 rph;
- Ganhos internos: 200 W contínuos, 60% radiação, 40% convecção e 100% sensível.
- Termóstato mantém a temperatura da fração autónoma entre 20°C e 27°C, sem limites de capacidade, 100% por convecção e 100% eficiente;
- Temperatura do solo: 10°C contínuo.

Na Tabela 3.7 encontram-se apresentados os valores específicos adotados para certos campos do *IDF Editor* (editor do *Software EnergyPlus*).

Tabela 3.7 – Campos do *IDF Editor* do *Software EnergyPlus*

Campo	Valor
Weather File	Denver ("DRYCOLD.TMY")
Surface Convection Algorithm: Inside	TARP
Surface Convection Algorithm: Outside	DOE-2
Solar Distribution	FullInteriorAndExterior
ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial	1
Temperature Capacity Multiplier	
ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial	1
Humidity Capacity Multiplier	
ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial	1
Carbon Dioxide Capacity Multiplier	
Visible Absorptance	0,6
Timestep	4
ShadowCalculation	1
Site:GroundReflectance	0,20
Material:Thermal Emissivity	0,90
Material:Solar Absorptance	0,60
Material:Visible Absorptance	0,60

### Caso 610 – Teste do Sombreamento a Sul para o Edifício de Construção Leve

O Caso 610, ilustrado na Figura 3.2, introduz ao Modelo Base uma pala horizontal com a dimensão de um 1 m sobre os vãos envidraçados na extensão total da parede Sul e à mesma altura que a cobertura. Este caso é idêntico ao Caso 600 no entanto testa a eficiência do sombreamento de vãos envidraçados expostos a Sul.

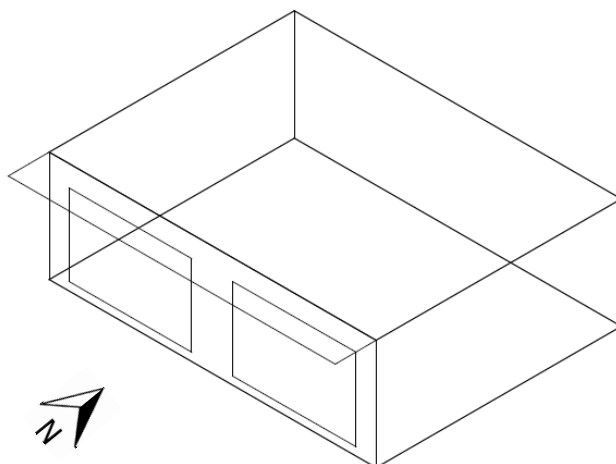


Figura 3.2 – Modelo Base com Sombreamento: Caso 610 (Fonte: BESTEST, 2010 [18])

### **Caso 620 – Teste da Orientação dos Vãos Envidraçados a Este/Oeste para o Edifício de Construção Leve**

O Caso 620, ilustrado na Figura 3.3, utiliza o Modelo Base mas com as seguintes alterações:

- Um vão envidraçado (de 6 m<sup>2</sup>) é alterado para a parede Este e outro para a parede Oeste. As propriedades dos elementos construtivos mantêm-se.
- Os vãos envidraçados na parede a Sul são eliminados e substituídos pela parede exterior utilizada no restante edifício.

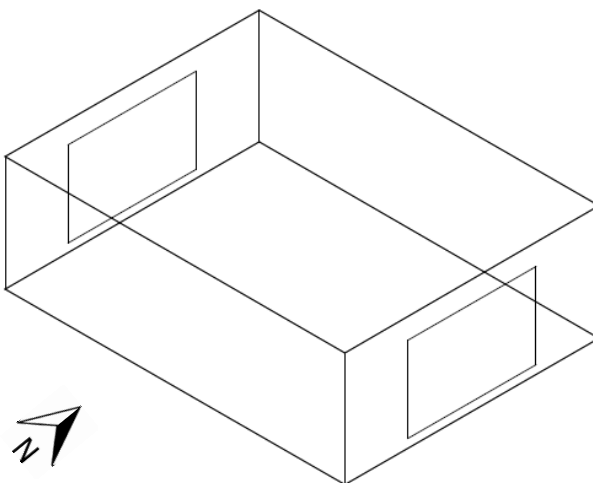


Figura 3.3 – Modelo Base com vãos envidraçados a Este/Oeste: Caso 620 (Fonte: BESTEST, 2010 [18])

### **Caso 630 – Teste do Sombreamento a Este/Oeste para o Edifício de Construção Leve**

O Caso 630 introduz ao Caso 620 palas horizontais e verticais com a dimensão de 1 m à volta dos vãos envidraçados a Este e Oeste. A pala horizontal é colocada à mesma altura da cobertura e estende-se sobre cada vão envidraçado de 3 m. As palas verticais são colocadas no limite de cada janela desde a cobertura ao pavimento. A ilustração na Figura 3.4 facilita a percepção da localização das palas no edifício.

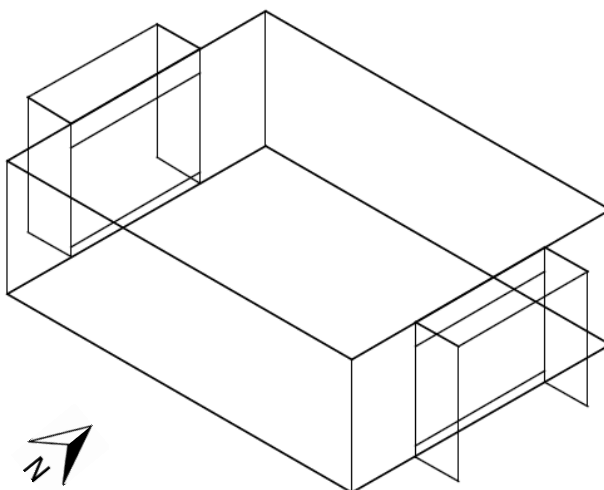


Figura 3.4 – Modelo Base com vãos envidraçados a Este/Oeste com sombreamento: Caso 630 (Fonte: BESTEST, 2010 [18])

### Caso 640 – Teste da Regulação do Termostato para o Edifício de Construção Leve

O Caso 640 é idêntico ao Caso 600, ilustrado na Figura 3.1, exceto quanto à ativação do equipamento de aquecimento e arrefecimento, em que:

- Entre as 23:00 horas e as 07:00 horas, o aquecimento é ligado se a temperatura da fração autónoma é inferior a 10°C;
- Entre as 07:00 horas e as 23:00 horas, o aquecimento é ligado se a temperatura da fração autónoma é inferior a 20°C;
- O arrefecimento é ligado sempre que a temperatura é superior a 27°C;
- Caso contrário, o aquecimento e arrefecimento é desligado.

### Caso 600FF – Teste da Temperatura Interior sem Equipamento de Aquecimento ou Arrefecimento para o Edifício de Construção Leve

Este Caso 600FF é o mesmo que o Caso 600 exceto que não existem equipamentos de aquecimento ou arrefecimento.

### Caso 900 – Modelo Base com Edifício de Construção Pesada

As series de testes de 900 utiliza o mesmo modelo de edifício que as series de testes de 600, no entanto, os materiais de construção das paredes exteriores e o pavimento é alterada para materiais mais pesados. As características dos materiais encontram-se apresentados na Tabela 3.8 e na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Construção das Paredes Exteriores – Caso 900.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.K)]	R [(m <sup>2</sup> .k)/W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Placa de Madeira	0,009	0,140	0,064	15,556	530	900
Isolamento de Espuma	0,0615	0,040	1,537	0,651	10	1400
Blocos de Betão	0,100	0,510	0,196	5,100	1400	1000

Tabela 3.9 – Construção do Pavimento – Caso 900.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.K)]	R [(m <sup>2</sup> .k)/W]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Isolamento Térmico	1,007	0,040	25,175	0,040	-	-
Laje de Betão	0,080	1,130	0,071	14,125	1400	1000

### Caso 910 – Teste de Sombreamento a Sul para o Edifício de Construção Pesada

O Caso 910 é idêntico ao Caso 610 mas tem a construção pesada do Caso 900.

### Caso 920 – Teste da Orientação dos Vãos Envidraçados a Este/Oeste para o Edifício de Construção Pesada

O Caso 920 é idêntico ao Caso 620 mas tem a construção pesada do Caso 900.

### Caso 930 – Teste do Sombreamento a Este/Oeste para o Edifício de Construção Pesada

O Caso 930 é idêntico ao Caso 630 mas tem a construção pesada do Caso 900.



### Caso 940 – Teste da Regulação do termostato para o Edifício de Construção Pesada

Por fim, o Caso 940 é idêntico ao Caso 640 mas tem a construção pesada do Caso 900.

### Caso 900FF – Teste da Temperatura Interior sem Equipamento de Aquecimento ou Arrefecimento para o Edifício de Construção Pesada

Por último, o Caso 900FF é idêntico ao Caso 900 exceto que não existem equipamentos de aquecimento ou arrefecimento.

#### 3.1.1.2. Resultados dos Casos Simulados

A Tabela 3.10 apresenta os resultados obtidos para a serie de Casos 600 simulados no EnergyPlus Versão 8.6.0 e os respetivos valores tabelados no BESTEST para os outros programas simulados e o EnergyPlus 6.0.0.023.

Tabela 3.10 – Resumo dos resultados das Series de Casos 600 simulados no *EnergyPlus* Versão 8.6.0

Caso	Parâmetro do Resultado	Intervalo de Resultados de Outros Programas BESTEST	Resultados EnergyPlus Versão 6.0.0.023 BESTEST	Resultados Obtidos: EnergyPlus Versão 8.6.0
600 – Construção Leve: Vãos Envidraçados a Sul	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	4,296 – 5,709	4,364	5,262
	Aquecimento Máximo (kW)	3,437 – 4,354	3,732	3,771
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	6,137 – 8,448	7,006	7,401
	Arrefecimento Máximo (kW)	5,965 – 7,188	6,678	6,805
610 – Construção Leve: Sombreamento Vãos Envidraçados a Sul	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	4,355 – 5,786	4,398	5,264
	Aquecimento Máximo (kW)	3,437 – 4,354	3,720	3,754
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	3,915 – 6,139	4,976	5,321
	Arrefecimento Máximo (kW)	5,669 – 6,673	6,274	6,463
620 – Construção Leve: Vãos Envidraçados a Este/Oeste	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	4,613 – 5,944	4,512	5,270
	Aquecimento Máximo (kW)	3,591 – 4,379	3,726	3,769
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	3,417 – 5,482	4,384	4,600
	Arrefecimento Máximo (kW)	3,634 – 5,096	4,005	4,126
630 – Construção Leve: Sombreamento	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	5,050 – 6,469	4,813	5,447
	Aquecimento Máximo (kW)	3,592 – 4,280	3,703	3,737
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	2,129 – 3,701	2,952	3,109

<b>Caso</b>	<b>Parâmetro do Resultado</b>	<b>Intervalo de Resultados de Outros Programas BESTEST</b>	<b>Resultados EnergyPlus Versão 6.0.0.023 BESTEST</b>	<b>Resultados Obtidos: EnergyPlus Versão 8.6.0</b>
Vãos Envidraçados a Este/Oeste	Arrefecimento Máximo (kW)	3,072 – 4,116	3,446	3,109
640 – Construção Leve: Regulação do Termóstato	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	2,751 – 3,803	2,667	3,294
	Aquecimento Máximo (kW)	5,232 – 6,954	6,265	6,354
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	5,952 – 8,097	6,710	7,192
	Arrefecimento Máximo (kW)	5,884 – 7,126	6,614	6,795
600FF – Construção Leve sem Equipamento de Aquecimento ou Arrefecimento	Máxima Temperatura Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	64,9 – 75,1	66,0	69,8
	Mínima Temperatura Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	-18,8 – -15,6	-17,5	-16,9
	Temperatura Média Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	24,2 – 27,4	26,2	24,7

Através da análise da Tabela 3.10 verifica-se que para o caso da construção leve os valores obtidos respeitam o intervalo obtido pelos outros programas, no entanto, os valores não são idênticos aos resultados obtidos pelo EnergyPlus provenientes do BESTEST, de fato, são no geral ligeiramente mais elevados.

A Tabela 3.11 apresenta os resultados obtidos para a serie de Casos 900 simulados no EnergyPlus Versão 8.6.0 e os valores tabelados no BESTEST.

Tabela 3.11 – Resumo dos resultados das Series de Casos 900 simulados no *EnergyPlus* Versão 8.6.0

<b>Caso</b>	<b>Parâmetro do Resultado</b>	<b>Intervalo de Resultados de Outros Programas BESTEST</b>	<b>Resultados EnergyPlus Versão 6.0.0.023 BESTEST</b>	<b>Resultados Obtidos: EnergyPlus Versão 8.6.0</b>
900 – Construção Pesada: Vãos Envidraçados a Sul	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	1,170 – 2,041	1,164	2,256
	Aquecimento Máximo (kW)	2,850 – 3,797	3,140	3,405
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	2,132 – 3,669	2,683	3,605
	Arrefecimento Máximo (kW)	2,888 – 3,932	3,320	4,262

<b>Caso</b>	<b>Parâmetro do Resultado</b>	<b>Intervalo de Resultados de Outros Programas BESTEST</b>	<b>Resultados EnergyPlus Versão 6.0.0.023 BESTEST</b>	<b>Resultados Obtidos: EnergyPlus Versão 8.6.0</b>
910 – Construção Pesada: Sombreamento Vãos Envidraçados a Sul	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	1,512 – 2,282	1,427	2,480
	Aquecimento Máximo (kW)	2,858 – 3,801	3,139	3,396
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	0,821 – 1,883	1,350	2,092
	Arrefecimento Máximo (kW)	1,896 – 3,277	2,640	3,436
920 – Construção Pesada: Vãos Envidraçados a Este/Oeste	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	3,261 – 4,300	3,087	3,516
	Aquecimento Máximo (kW)	3,308 – 4,061	3,453	3,550
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	1,840 – 3,313	2,683	2,633
	Arrefecimento Máximo (kW)	2,385 – 3,505	2,835	3,265
930 – Construção Pesada: Sombreamento Vãos Envidraçados a Este/Oeste	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	4,143 – 5,335	3,785	4,134
	Aquecimento Máximo (kW)	3,355 – 4,064	3,475	3,547
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	1,039 – 2,238	1,745	1,687
	Arrefecimento Máximo (kW)	1,873 – 3,080	2,332	2,836
940 – Construção Pesada: Regulação do Termóstato	Necessidades Anuais de Aquecimento (MWh)	0,793 – 1,411	0,727	1,285
	Aquecimento Máximo (kW)	3,980 – 6,428	4,785	5,497
	Necessidades Anuais de Arrefecimento (MWh)	2,079 – 3,546	2,606	3,340
	Arrefecimento Máximo (kW)	2,888 – 3,932	3,320	3,340
900FF – Construção Pesada sem Equipamento de Aquecimento ou Arrefecimento	Máxima Temperatura Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	41,8 – 46,4	43,7	48,0
	Mínima Temperatura Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	-6,4 – -1,6	-2,4	-6,7
	Temperatura Média Anual por Hora da Fração Autónoma (°C)	24,5 – 27,5	26,4	25,0

Através da análise dos valores obtidos na Tabela 3.11 constata-se que na construção pesada nem todos os valores obtidos respeitam o intervalo obtido pelos outros programas do BESTEST (no Caso 900, Caso 910, Caso 930 e no Caso 900FF). E os valores não são idênticos aos resultados obtidos pelo EnergyPlus provenientes do BESTEST assim como são no geral valores mais elevados.

### 3.1.1.3. Análise dos Resultados dos Casos Simulados

Verifica-se ligeiras discrepâncias nos resultados obtidos pela Versão 8.6.0 do *Software EnergyPlus* em relação aos valores obtidos pela Versão 6.0.0.023 registados no BESTEST apresentados na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11. Esta distinção de resultados deve-se principalmente às várias atualizações que já foram executadas ao *software*.

Por outro lado, em quatro dos testes realizados nos casos com construção pesada, alguns valores obtidos não estão dentro do intervalo de valores anunciados no BESTEST pelos outros programas, como apresenta a Tabela 3.11. No entanto, estes valores que não verificam o intervalo, estão a menos de 11,1 % do limite de valores do BESTEST.

Outro motivo encontrado pela diferença de resultados quer com o mesmo programa quer com os outros programas deve-se ao ficheiro climático. Uma vez que o ficheiro utilizado nas simulações dos testes desta dissertação pertence à base de dados online do EnergyPlus (*USA\_CO\_Denver-Stapleton.724690.TMY*) [17] e o ficheiro utilizado pelos programas que realizaram as simulações do BESTEST (*DRYCOLD.TMY*), pertence a um CD que acompanha a norma americana ANSI/ASHRAE Standard 140-200. Desta forma não é possível garantir que ambos os ficheiros possuem os mesmos dados.

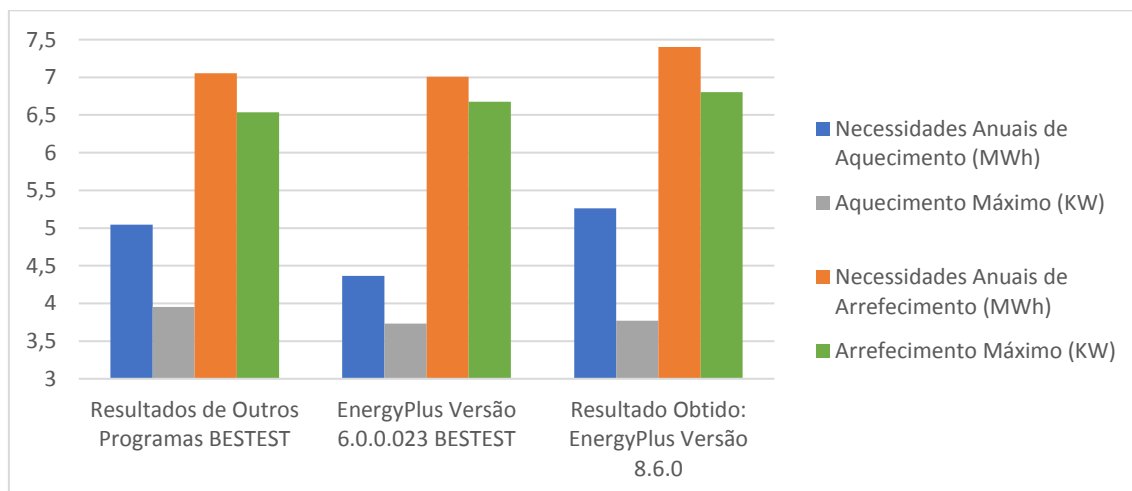


Figura 3.5 – Gráfico dos Resultados do Caso 600 - Construção Leve: Vãos Envidraçados a Sul

Para finalizar, os valores obtidos na realização dos testes 600 a 640, 900 a 940 e dos testes 600FF e 900FF são suficientemente próximos dos tabelados pelo BESTEST, como é possível de analisar no exemplo ilustrado na Figura 3.5. Deste modo, há condições para concluir que o *software EnergyPlus* é um programa preciso e fiável.

## 3.2. Descrição do Edifício em Estudo

O edifício simulado no *software* é inspirado numa moradia unifamiliar existente de tipologia T3. A sua planta tem a dimensão de 15 m por 8,65 m (com 129 m<sup>2</sup> de área de pavimento) e 3 m de pé direito. Apresenta nove vãos envidraçados, dos quais três estão a Sul e

possuem sobre eles palas horizontais. Na cobertura existem palas inclinadas com o fim de suportar painéis fotovoltaicos. O edifício encontra-se ilustrado na Figura 3.6 e na Figura 3.7.

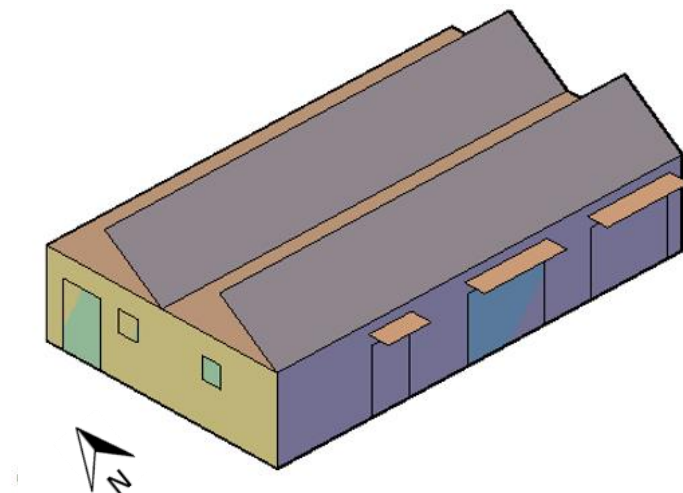


Figura 3.6 – Edifício em Estudo – Vista isométrica da esquina entre Sul e Oeste

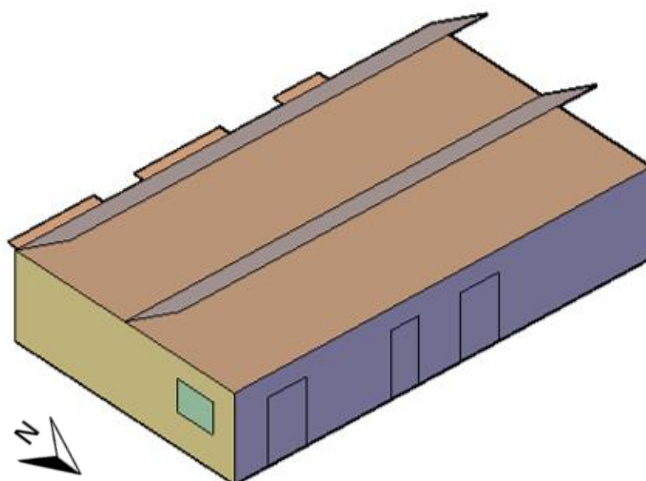


Figura 3.7 – Edifício em Estudo – Vista isométrica da esquina entre Norte e Este

### 3.2.1. Soluções Construtivos do Edifício em Estudo

De modo a testar as necessidades de aquecimento do edifício sujeito a diferentes propriedades térmicas, são testadas quatro soluções construtivos nas paredes envolventes e na cobertura.

A primeira solução construtiva é enunciada nas tabelas Tabela 3.12 e Tabela 3.13 ( $C_p$  – calor específico,  $e$  – espessura,  $R$  – resistência térmica,  $R_T$  – resistência térmica total, nas coberturas  $R_{asc}$ , referente ao Inverno,  $R_{des}$ , referente ao Verão,  $U$  – coeficiente de transmissão térmica (nas coberturas  $U_{asc}$ , referente ao Inverno,  $U_{des}$ , referente ao Verão),  $\lambda$  – condutibilidade térmica,  $\rho$  – massa volúmica aparente seca). A solução é constituída por uma parede simples com tijolo furado de espessura de 0,22 m e reboco tradicional nas faces interiores e exteriores. A cobertura não possui isolamento térmico assim como as paredes exteriores, e é constituída, do exterior para o interior, por um revestimento pesado de ladrilhos, camada de solidarização de betonilha, camada de separação de geotêxtil, sistema de impermeabilização de betume polímero, barreira para-vapor de folha de polietileno, camada de forma de betonilha, estrutura

resistente de betão armado e por fim reboco. As propriedades dos materiais são provenientes da Informação Técnica Edifícios 50 [19].

Tabela 3.12 – Solução Construtiva 1: Paredes Envolventes.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Reboco	0,02	1,30	1800	837	0,02	0,73	1,4
Tijolo	0,22	-	1200	837	0,52		
Reboco	0,02	1,30	1800	837	0,02		

Tabela 3.13 – Solução Construtiva 1: Cobertura.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Ladrilhos	0,02	1,30	1800	837	0,02	R <sub>Tasc</sub> =0,4 4	U <sub>asc</sub> =2,3
Betonilha	0,05	0,22	1800	837	0,23		
Geotêxtil	-	-	-	-	-		
Betume-polímero	-	-	-	-	-		
Folha de polietileno	-	-	-	-	-		
Betonilha	0,05	1,3	1800	837	0,02	R <sub>Tdesc</sub> =0,6	U <sub>desc</sub> = 1,7
Betão armado	0,20	2,0	2300	880	0,10		
Reboco	0,02	1,3	1800	837	0,02		

A seguinte solução construtiva é um ETICS constituído por um revestimento exterior de rede de fibra de vidro seguido de 3 cm de isolamento térmico de EPS, um pano de alvenaria de tijolo de 0,22 m e um revestimento interior em reboco tradicional, como apresenta a Tabela 3.14. A cobertura é idêntica à solução construtiva anterior, no entanto tem a mesma espessura de isolamento térmico que as paredes, deste modo, é uma cobertura não invertida, como apresenta a Tabela 3.15.

Tabela 3.14 – Solução Construtiva 2: Paredes Envolventes.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02	1,4	0,71
EPS	0,03	0,045	12	1200	0,67		
Tijolo	0,22	-	1200	837	0,52		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Tabela 3.15 – Solução Construtiva 2: Cobertura.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	$R_T$ [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Ladrilhos	0,02	1,30	1800	837	0,02	$R_{Tasc}=1,1$	$U_{asc}=0,90$
Betonilha	0,05	0,22	1800	837	0,23		
Geotêxtil	-	-	-	-	-		
Betume-polímero	-	-	-	-	-		
EPS	0,03	0,045	12	1200	0,67		
Folha de polietileno	-	-	-	-	-	$R_{Tdesc}=1,3$	$U_{desc}=0,79$
Betonilha	0,05	1,3	1800	837	0,02		
Betão armado	0,20	2,0	2300	880	0,10		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

A mesma solução construtiva de ETICS mencionada anteriormente é aplicada nos dois casos seguintes. No entanto, existe um aumento gradual de 3 cm do isolamento térmico, quer para as paredes exteriores quer para a cobertura, como indicado nas tabelas seguintes, Tabela 3.16, Tabela 3.17, Tabela 3.18 e Tabela 3.19.

Tabela 3.16 – Solução Construtiva 3: Paredes Envolventes.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	$R_T$ [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02	2,1	0,49
EPS	0,06	0,045	12	1200	1,33		
Tijolo	0,22	-	1200	837	0,52		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Tabela 3.17 – Solução Construtiva 3: Cobertura.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	$R_T$ [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Ladrilhos	0,02	1,30	1800	837	0,02	$R_{Tasc}=1,8$	$U_{asc}=0,56$
Betonilha	0,05	0,22	1800	837	0,23		
Geotêxtil	-	-	-	-	-		
Betume-polímero	-	-	-	-	-		
EPS	0,06	0,045	12	1200	1,33		
Folha de polietileno	-	-	-	-	-	$R_{Tdesc}=1,9$	$U_{desc}=0,51$
Betonilha	0,05	1,3	1800	837	0,02		
Betão armado	0,20	2,0	2300	880	0,10		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Tabela 3.18 – Solução Construtiva 4: Paredes Envolventes.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02	2,51	0,40
EPS	0,08	0,045	12	1200	1,78		
Tijolo	0,22	-	1200	837	0,52		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Tabela 3.19 – Solução Construtiva 4: Cobertura.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Ladrilhos	0,02	1,30	1800	837	0,02	R <sub>Tasc</sub> = 2,22	U <sub>asc</sub> = 0,45
Betonilha	0,05	0,22	1800	837	0,23		
Geotêxtil	-	-	-	-	-		
Betume-polímero	-	-	-	-	-		
EPS	0,08	0,045	12	1200	1,78	R <sub>Tdesc</sub> = 2,38	U <sub>desc</sub> = 0,42
Folha de polietileno	-	-	-	-	-		
Betonilha	0,05	1,3	1800	837	0,02		
Betão armado	0,20	2,0	2300	880	0,10		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Por fim, a solução construtiva para o pavimento e as paredes interiores é igual em todas as simulações do edifício. O pavimento é constituído, do exterior para o interior, por uma laje de betão armado e um revestimento de parquet, como apresenta a Tabela 3.20. E a parede interior é constituída por revestimentos de reboco em ambas as faces do pano de tijolo furado de 0,11 m, como apresenta a Tabela 3.21.

Os vãos envidraçados são constituídos por vidros duplos e estores que se ativam sempre que a temperatura interior atinge os 25 °C, como indica a Tabela 3.22.

Tabela 3.20 – Solução Construtiva: Pavimento.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Betão armado	0,20	2,0	2300	880	0,10	0,34	2,9
Parquet	0,01	0,15	500	1200	0,07		



Tabela 3.21 – Solução Construtiva: Parede Interior.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02	0,71	1,4
Tijolo	0,11	-	1200	837	0,41		
Reboco	0,02	1,30	1900	840	0,02		

Tabela 3.22 – Solução Construtiva: Vãos Envidraçados.

Material	e [m]	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]	R [(m².°C)/W]	R <sub>T</sub> [(m².°C)/W]	U [W/(m².°C)]
Vidro	0,006	0,9	-	-	0,01	R <sub>T</sub> sem Estores	U sem Estores
Espaço de ar	0,014	-	-	-	0,17	= 0,35	= 2,8
Vidro	0,006	0,9	-	-	0,01	R <sub>T</sub> com Estores	U com Estores
Estores	0,005	0,1	-	-	0,05	= 0,40	= 2,5

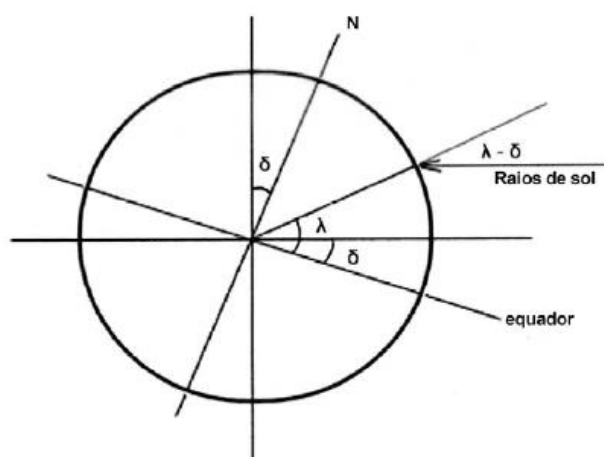
### 3.2.2. Palas Horizontais e Inclinadas

As palas horizontais estão sobre os vãos envidraçados na fachada a Sul e são dimensionadas de acordo com o Comportamento Higrotérmico de Edifícios [20].

Inicia-se com o cálculo da declinação  $\delta$  definido pelo plano que une o sol ao centro da terra com o equador (Figura 3.8), que é obtido por:

$$\text{sen } \delta = -\text{sen } 23,45 \cdot \cos \frac{360 \cdot (n + 10)}{365,25} \quad (3.1)$$

Em que  $n$  são o número de dias do ano.

Figura 3.8 – Declinação  $\delta$  (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016 [20])

Em qualquer ponto da superfície da terra, os raios do sol formam um ângulo com a normal à superfície nesse ponto, o ângulo zenital  $\theta_s$ . O seu valor ao meio dia é dado pela diferença entre a latitude  $\lambda$  e a declinação  $\delta$ ,  $\theta_s = \lambda - \delta$  (ilustrado na Figura 3.8).

As palas são perpendiculares à parede e provocam o sombreamento dos vãos envidraçados. Como ilustra a Figura 3.9, tem-se a sombra produzida pelo ponto P com as

coordenadas  $x$  e  $y$ . Se a parede tem um azimute  $\phi_p$  e o sol um azimute  $\phi_s$ , o azimute do sol em relação à parede é dado por  $\Delta\phi = \phi_s - \phi_p$ . Tem-se  $z$  como a largura da pala, então:

$$x = z \cdot \tan \Delta\phi \quad (3.2)$$

E como o ângulo zenital do sol é  $\theta_s$ , obtém-se:

$$y = z \frac{\cot \theta_s}{\cos \Delta\phi} \quad (3.3)$$

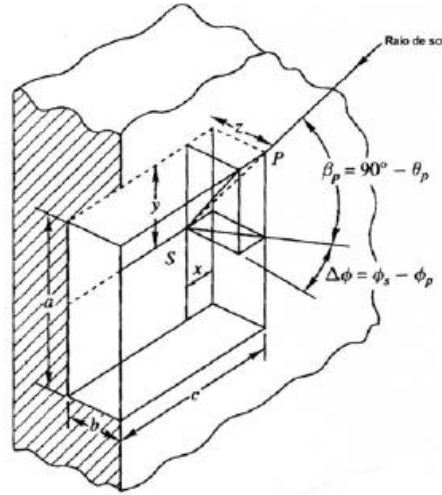


Figura 3.9 – Pala perpendicular a uma parede (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016 [20])

Para obter o efeito de sombreamento desejado pelas palas horizontais, é necessário que no Inverno a sombra tenha uma altura máxima de  $y_2$  e no Verão  $y_1$ , como ilustra a Figura 3.10.

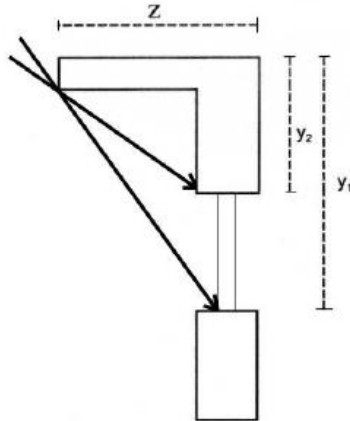


Figura 3.10 - Exemplo de uma pala horizontal (Fonte: Comportamento Higrotérmico de Edifícios, 2016 [20])

Como as palas são colocadas a Sul, o azimute da parede é nulo, e ao meio dia o azimute do Sol é nulo. A equação 3.3 assume a forma simplificada de:

$$y = z \cdot \cot(\lambda - \delta) \quad (3.4)$$

Sabe-se a altura do vão envidraçado  $h$ , pelo que  $y_1 - y_2 = h$ , e sabe-se os respetivos valores das declinações correspondentes às duas datas, pela equação anterior é possível obter a largura da pala:

$$z = \frac{h}{\cotg(\lambda - \delta_{Ver\tilde{a}o}) - \cotg(\lambda - \delta_{Inverno})} \quad (3.5)$$

E por fim obtém-se o comprimento da zona opaca  $y_2$  pela equação 3.4.

A Tabela 3.23 apresenta as dimensões das palas utilizadas para as diferentes zonas climáticas estudadas.

Tabela 3.23 – Dimensões das Palas Horizontais em Lisboa, Porto e Bragança.

	Altura Vão Envidraçado a Sul [m]	Latitude [°]	Dia de Inverno	Dia de Verão	z [m]	y <sub>2</sub> [m]
Lisboa	2,25	38,7	1	183	0,74	0,40
Porto	2,25	41,2	1	183	0,87	0,47
Bragança	2,25	41,8	1	183	0,91	0,49

A inclinação dos painéis fotovoltaicos é definida de acordo com a latitude do local em que são instaladas com direção Sul, como define a ADENE [8]. Como são estudadas várias zonas climáticas, optou-se por uma latitude considerada ótima em Portugal. Deste modo, dimensionou-se palas na cobertura com um ângulo de inclinação de 35° com a horizontal, com orientação para Sul, para tomar partido da maior radiação solar incidente. Estas palas têm o fim de possibilitar o sombreamento na cobertura plana e o suporte de painéis fotovoltaicos (dimensão média de um painel é de 1 m por 1,6 m). Obteve-se duas palas no comprimento total do edifício (15 m) com 2,16 m de altura (como ilustra a Figura 3.6 e a Figura 3.7 no início do subcapítulo 3.2).

### 3.2.3. Implementação do Edifício no *Software EnergyPlus*

O edifício é implementado no *software EnergyPlus* alinhado com o Norte definido por uma zona, em que todas as divisões interiores encontram-se à mesma temperatura. É utilizado *country* ou *ocean* de acordo com o tipo de terreno de cada zona estudada no interior e no litoral do país, respetivamente.

As simulações possuem quatro ocupantes que exercem atividades com um valor de metabolismo de 100 W/pessoa.

A taxa de renovação do ar horária média anual possui o valor de 0,6h<sup>-1</sup>, que garante a qualidade do ar interior de acordo com a Portaria n.º 349-B/2013 [21].

O horário de consumo de equipamentos, a ativação da iluminação, a ativação do termostato do aparelho de aquecimento e arrefecimento e as horas de ocupação do edifício são implementados no campo *Schedule*.

Deste modo, o nível de ocupação ao longo de um dia é definido com o fim de contribuir para os ganhos internos de calor. E os quatro ocupantes estão na zona das 24:00 às 07:00 horas, depois não há ocupantes das 07:00 às 08:00 horas, das 08:00 às 14:00 horas 25% dos moradores estão no edifício, das 14:00 às 17:00 não está ocupado, entre as 17:00 e as 19:00 horas 25 % dos ocupantes estão na moradia e por fim, das 19:00 às 24:00 horas a ocupação é de 75 %.

A temperatura interior mínima na zona é de 18 °C na estação de aquecimento e 25 °C na estação de arrefecimento, como está regulamentado no Despacho n.º 15793-K/2013 [22] e

na Portaria n.º 349-B/2013 [21]. Deste modo, o aparelho de climatização é ativado sempre que estas temperaturas interiores não são cumpridas.

Entre outubro e janeiro 70 % da iluminação encontra-se ativa das 18:00 às 24:00 horas e 5 % entre as 00:00 e as 18:00 horas, enquanto que entre maio e outubro, a iluminação encontra-se 70 % ativada das 20:00 às 24:00 horas e 5 % entre as 0:00 e as 20:00 horas. E consome um valor médio de 10 W/m<sup>2</sup>.

Os equipamentos estão ligados durante todo o ano a 15 % entre as 00:00 e as 18:00 horas e a 70 % das 18:00 às 24:00 horas. E consomem um valor médio de 2 W/m<sup>2</sup> [23].

Nos cálculos do sombreamento, iluminação natural e produção de energia solar é admitido que a trajetória do sol ocorre em média a cada 20 dias.

O intervalo de tempo de simulação é de 15 minutos definidos no campo *Timestep* com o valor de 4. Não é considerada a existência de pontes térmicas no edifício e a massa interna do edifício é de 290 m<sup>2</sup>.

### 3.3. Flexibilidade Energética no Edifício em Estudo

A abordagem realizada nesta dissertação é fundamentada pelos estudos realizados por Reynders *et al.* [15] e Le Dréau *et al.* [4]. Deste modo, é simulado um aquecimento de referência que é comparado com um aquecimento alterado durante um intervalo de tempo definido, para uma solução construtiva do edifício em estudo inserido num contexto climático. As informações que são extraídas deste procedimento são nomeadamente a capacidade de armazenamento estrutural disponível, a eficiência do armazenamento, a mudança de temperatura operativa e a autonomia do edifício relativamente ao aquecimento, de acordo com a sua solução construtiva e as condições climáticas. Assim, a análise da flexibilidade ocorre através da análise do armazenamento de calor no edifício em diferentes cenários de ativação do ar condicionado.

De modo a simplificar os resultados obtidos, o aquecimento de referência tem o objetivo de manter a temperatura interior mínima de conforto de 18 °C [23].

As simulações são independentes, isto é, são testados casos isolados do aumento da temperatura de referência em 2, 4 e 6 °C durante 2, 4, 6, 12 e 24 horas para cada solução construtiva em diferentes zonas climáticas do país. Esta modelação da temperatura ocorre com um aumento gradual da temperatura durante 45 minutos, uma vez que, de acordo com ASHRAE [24], a temperatura interior não deve aumentar em mais de 1,1 °C em 15 minutos ou 2,1 °C em 1 hora para não causar o desconforto dos utentes. Esta condição é tomada em consideração uma vez que neste trabalho o aquecimento é aumentado até 1,5 °C em 15 minutos.

As modelações do aquecimento iniciam-se às 14:15 horas de um dia representativo da estação de aquecimento (a 6 de fevereiro), uma vez que consiste na hora de temperatura mais elevada naquele dia, quer no exterior quer no interior da habitação, e possivelmente a hora com mais energia gerada pelos painéis fotovoltaicos no local que pode ser utilizada para o aquecimento (a energia renovável não é calculada neste trabalho, mas é hipoteticamente ponderada). E segundo os estudos de Reynders *et al.* [15], a eficiência do armazenamento de calor na estrutura de um edifício varia durante o dia, e pré-aquecer o edifício antes de um período com elevados ganhos solares ou quando está desocupado diminui a eficiência em 30%. Deste modo, o pré-aquecimento inicia-se antes do anoitecer para possibilitar a libertação do calor quando as temperaturas são mais baixas e o edifício está completamente ocupado.

O início da modelação da temperatura faz com que as necessidades de aquecimento aumentem drasticamente e criem um “pico” de energia. Este pico é atenuado com o início da modelação na hora de maior calor e o aumento gradual da temperatura interior, de acordo com os pontos definidos nos dois parágrafos anteriores. A título ilustrativo, a Figura 3.11 apresenta através da linha a laranja um pico no início da modelação da temperatura às 08:00 horas, com

um valor de 5,5 kWh. Este valor de energia diminui quando a modelação se inicia às 15:00, apresentado através da linha a azul, onde o valor da energia é inicialmente de 4,9 kWh. Por fim, a linha a verde ilustra a modelação gradual da temperatura com início às 14:15 com um valor de 3,49 kWh.

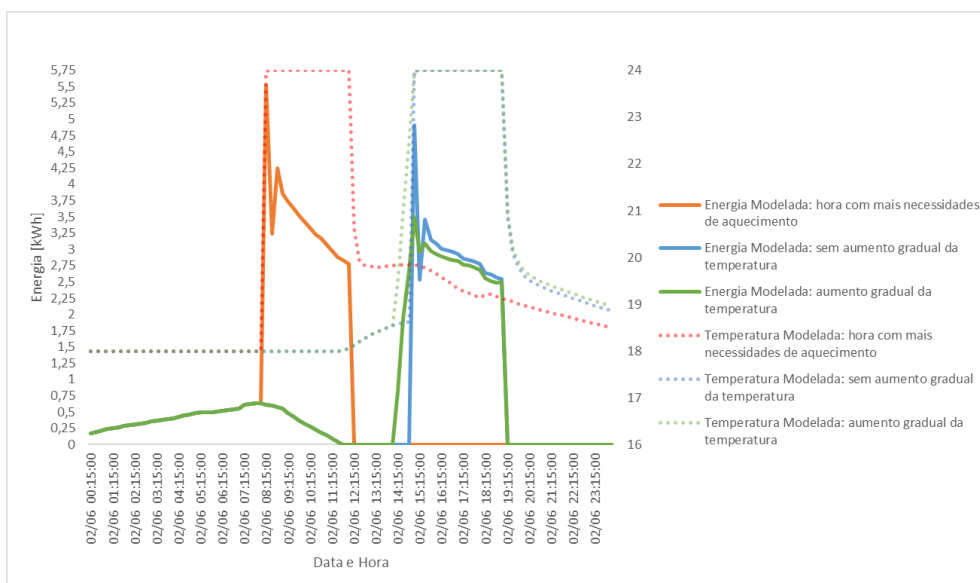


Figura 3.11 – Exemplo da Modelação da temperatura interior.

As zonas climáticas cujas as condições climáticas são testadas nesta dissertação são a zona de Lisboa, de Bragança e do Porto. E os seus ficheiros climáticos são obtidos pela base de dados online do EnergyPlus [18].

A Figura 3.12 apresenta as temperaturas exteriores para três dias representativos da estação de aquecimento (6 a 8 de fevereiro). A análise da figura permite verificar temperaturas mais baixas em Bragança, com máximas de 14 °C e mínimas de 0,6 °C, e as temperaturas de Lisboa e do Porto com máximas de 16,9 e 21 °C e mínimas de 7,8 e 5 °C, respetivamente.

Por fim, neste trabalho, são testados casos práticos da gestão temporal da flexibilidade energética no edifício em estudo de acordo com o valor da eletricidade em vigor em Portugal. De acordo com a ERSE [1], as tarifas bi-horárias podem ser semanais ou diárias. Elas dividem a semana ou um dia em dois períodos, sendo os preços diferentes em cada um deles, isto é, o valor do kWh de eletricidade varia segundo o momento em que é feito esse consumo de energia. A diferença está nas horas de vazio, em que o preço da energia é mais baixo e nas horas fora de vazio em que os preços da energia são mais altos.

Neste trabalho é considerada uma tarifa bi-horária diária com as horas de vazio entre as 22:00 e às 8:00 horas com um custo de 0,1014 €/kWh e as restantes horas, entre as 8:00 e as 22:00 horas, como horas de ponta com um custo de 0,1942 €/kWh. Os valores são provenientes do portal da ERSE para uma tarifa BTN até 20,7 kVA adequado para clientes residenciais [1].

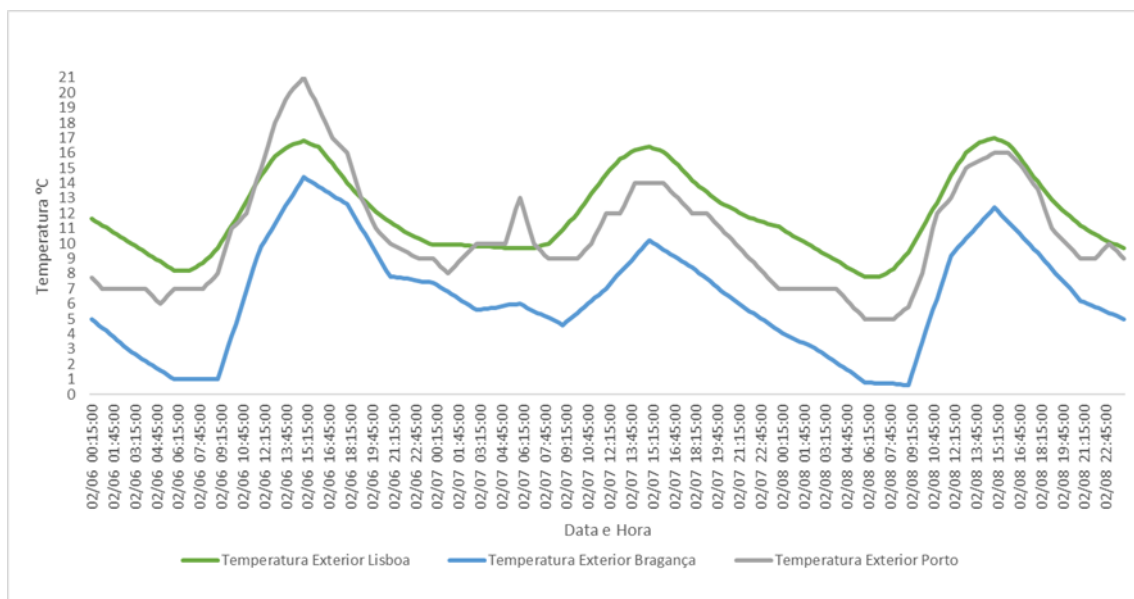


Figura 3.12 - Temperatura exterior dos distritos em estudo.

## 4. Análise de Resultados

Nos subcapítulos que se seguem, são enumerados e avaliados os resultados das simulações realizadas para quatro soluções construtivas do edifício em estudo em três zonas climáticas de Portugal.

É importante referir que dadas as condições do edifício, desde as medidas passivas aplicadas, tais como o sombreamento adequado dos vãos envidraçados e da cobertura, a ventilação natural, o contacto da laje do pavimento com o terreno e outros fatores, tornou-se desnecessário ligar o equipamento de climatização na estação de arrefecimento, porque a temperatura máxima de conforto do ar interior de 25 °C não é ultrapassada [23]. Pois Portugal é um país com um clima maioritariamente mediterrânico, e por isso, quando se recorre a medidas passivas adequadas, não é necessário recorrer a sistemas ativos na estação de arrefecimento [11].

Porém, na situação de Inverno é necessário compensar partes das necessidades de climatização. É neste aspeto que este capítulo se foca. Com este intuito é utilizado um sistema de climatização ambiente que, quando conjugado com um sistema de aproveitamento das energias renováveis, contribui para a redução significativa do impacte ambiental do edificado.

Por fim, de modo a simplificar a análise dos resultados obtidos nas simulações, considera-se que o equipamento de climatização tem um rendimento igual a um. Assim, os valores de energia obtidos correspondem à energia final.

### 4.1. Zona Climática de Lisboa

Neste subcapítulo apresenta-se o caso de estudo aplicado às condições climáticas de Lisboa para cada solução construtiva. A Figura 4.1 apresenta as temperaturas interiores do edifício com diferentes soluções construtivas em três dias representativos da estação de aquecimento. Na solução com paredes exteriores simples as temperaturas variam entre os 16,2 e 17,8 °C, enquanto que no caso com paredes exteriores com mais isolamento térmico, (ETICS com 8 cm de EPS), as temperaturas variam entre os 17,6 e 19,3 °C. Logo, à partida sabe-se que as necessidades de aquecimento são menores com o aumento do isolamento térmico.

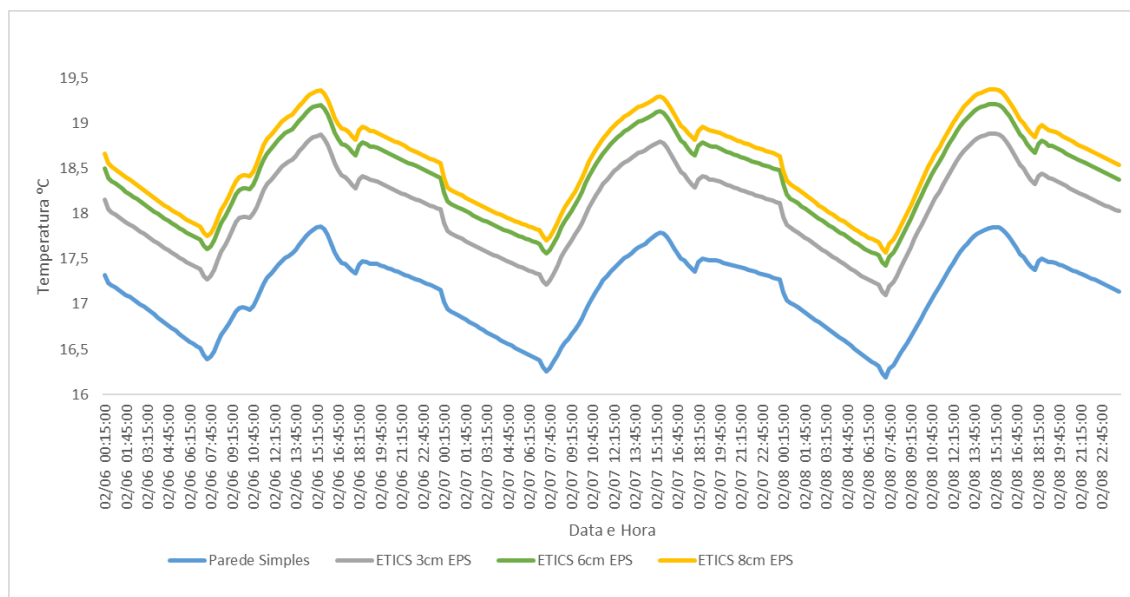


Figura 4.1 - Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento em Lisboa.

Através da análise da Tabela 4.1, confirma-se que as necessidades de aquecimento diminuem drasticamente com o aumento do isolamento térmico, para três dias da estação de aquecimento (6 a 8 de fevereiro), onde as temperaturas mínimas de conforto são mantidas. A solução construtiva com maior quantidade de isolamento térmico apresenta uma redução do aquecimento em 94% relativamente à solução construtiva com paredes exteriores simples.

Tabela 4.1 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento em Lisboa.

Solução Construtiva	Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento: Lisboa [kWh]
Parede Simples	61,24
ETICS 3 cm EPS	18,87
ETICS 6 cm EPS	9,85
ETICS 8 cm EPS	3,80

De seguida, inicia-se a análise dos resultados obtidos na sequência das simulações do edifício constituído por paredes envolventes simples (sem isolamento térmico – Solução Construtiva 1 descrito no subcapítulo 3.2).

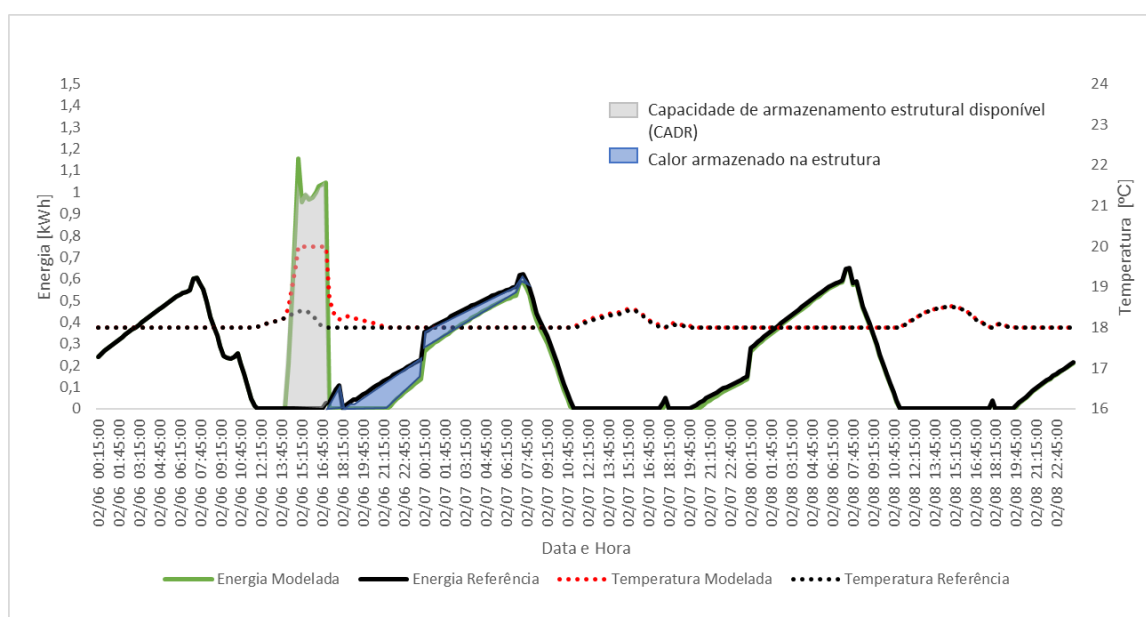


Figura 4.2 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Lisboa.

A Figura 4.2 apresenta a evolução da temperatura interior através do aumento do aquecimento para 20 °C durante um intervalo de tempo de 2 horas em Lisboa. A análise da figura permite identificar a energia útil para o aquecimento na situação de referência (temperatura interior igual a 18 °C - linha contínua a preto) junto da situação simulada (linha contínua a verde). A área a cinzento indica a capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ), referido no subcapítulo 2.4 como um indicador de flexibilidade, calculado pela diferença entre a energia de referência e a energia modelada durante o intervalo de tempo da modelação. A figura também indica a quantidade de calor armazenada na estrutura do edifício através da inércia térmica, apresentada pela área a azul como, a diferença entre a energia de referência e a energia modelada após o intervalo de tempo da modelação. Como se pode observar, o calor armazenado afeta as necessidades de aquecimento e leva à desativação da climatização durante 4 horas e



15 minutos. E somente ao fim de 24 horas que o aquecimento volta a apresentar um comportamento idêntico aos valores energéticos do aquecimento de referência.

A Figura 4.3 apresenta a evolução da temperatura interior durante um intervalo de tempo de 6 horas a 24 °C. A análise da figura revela que a quantidade de calor armazenada na estrutura do edifício afeta o aquecimento modelado durante pelo menos 48 horas e pode ser desativado durante 9 horas e 15 minutos sem afetar o conforto térmico.

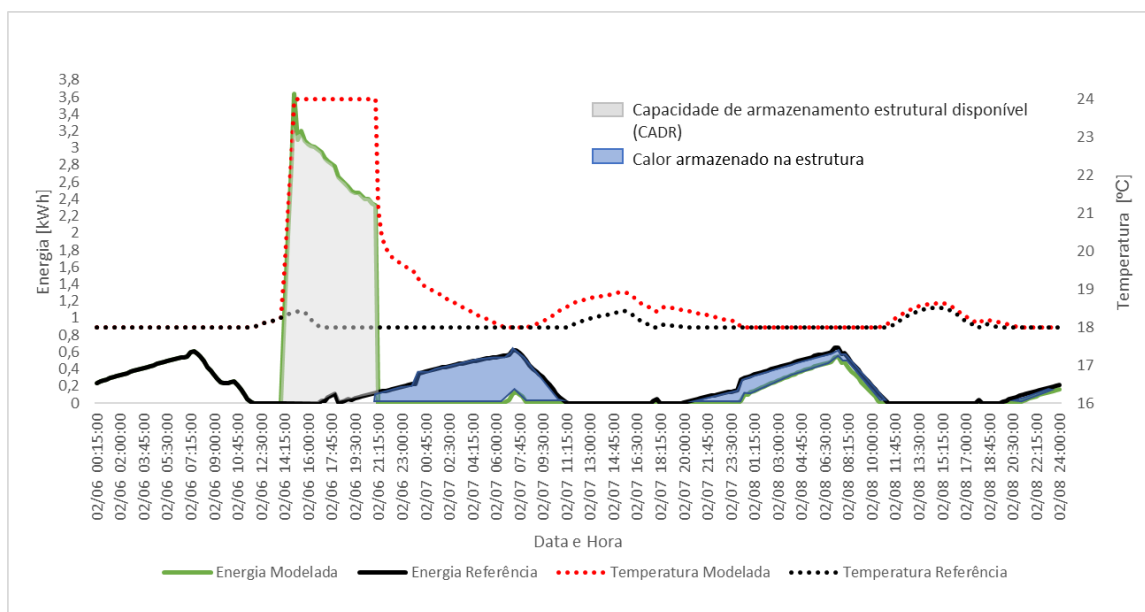


Figura 4.3 – Modelação da temperatura interior durante 6 horas a 24 °C: Parede Simples, Lisboa.

A Figura 4.4 indica o aquecimento modelado durante um intervalo de tempo de 24 horas a 24 °C. A análise da figura indica que a energia necessária para manter a temperatura mínima de conforto após a modelação é reduzida durante pelo menos 3 dias (72 horas) em relação à energia de referência. E o aquecimento só volta a ser ligado após 33 horas e 30 minutos.

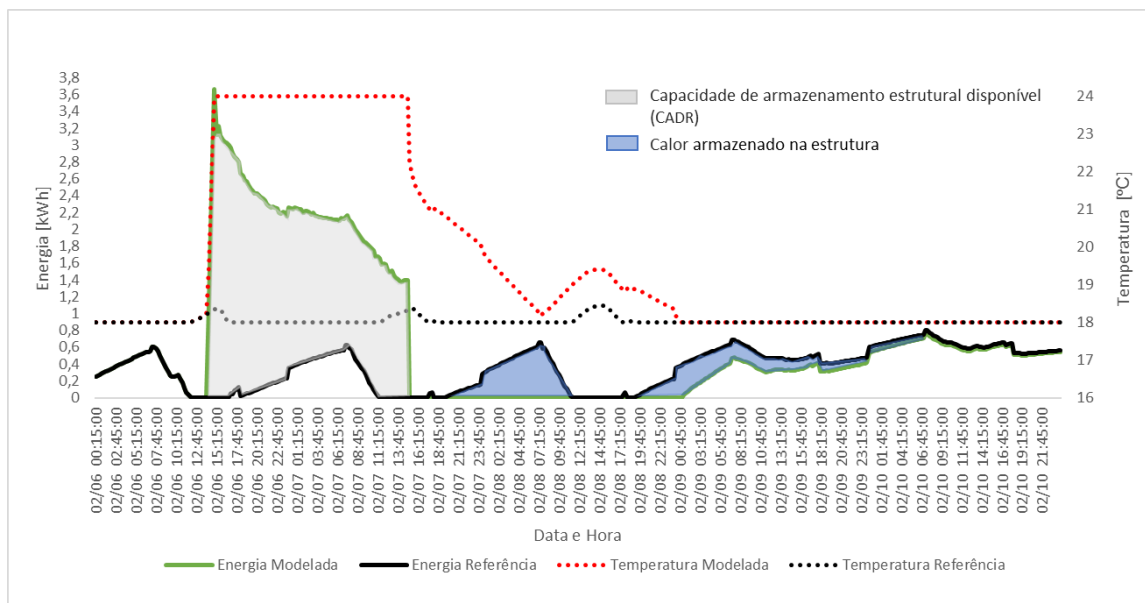


Figura 4.4 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Lisboa.

A Figura 4.5 apresenta a capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) para todos os casos com paredes exteriores simples. A análise da figura permite identificar a duração e a temperatura do aquecimento modelado bem como a quantidade de energia que pode ser armazenada na estrutura do edifício sob a forma de calor.

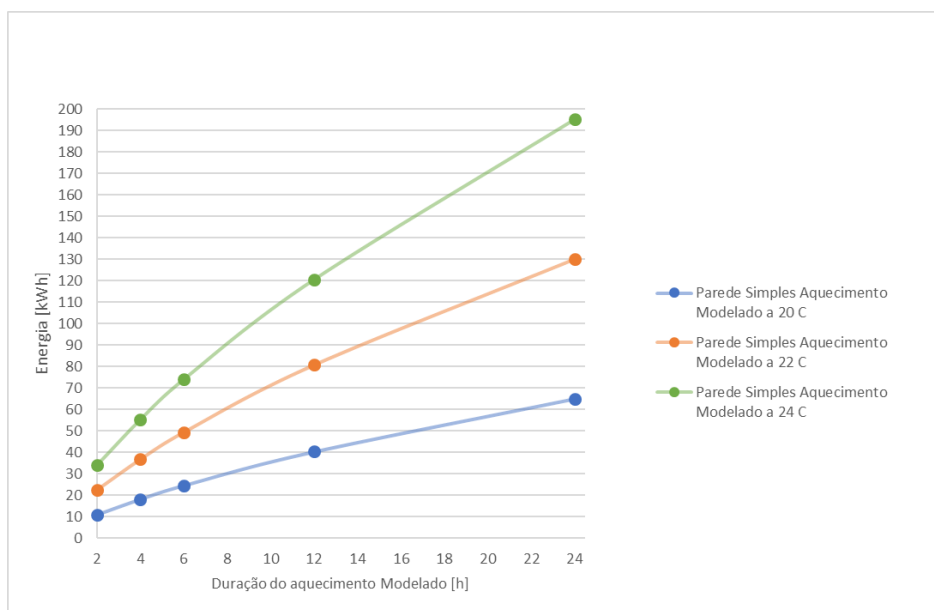


Figura 4.5 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede Simples, Lisboa.

A análise da Figura 4.5 permite retirar uma conclusão importante: a capacidade de armazenamento estrutural ( $C_{ADR}$ ) aumenta com o aumento do período de aquecimento e com o aumento da temperatura interior, e alcança um valor de 195,24 kWh no caso da temperatura interior de 24 °C durante um intervalo de tempo de 24 horas.

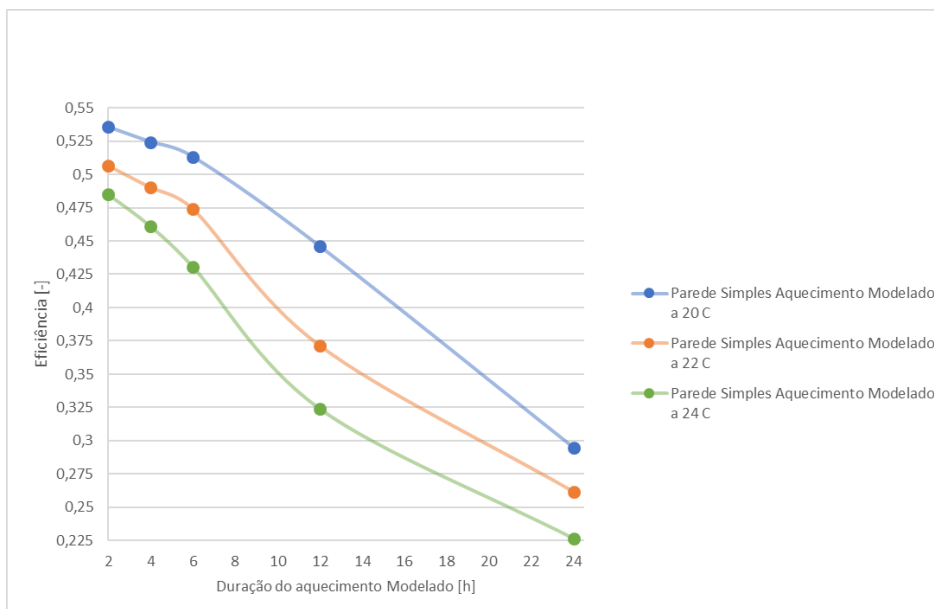


Figura 4.6 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede Simples, Lisboa.

A Figura 4.6 apresenta a eficiência do armazenamento de energia sob a forma de calor na estrutura do edifício em estudo, tal como indicado no subcapítulo 2.4. A análise da figura

permite quantificar a eficiência de acordo com a duração e a temperatura do aquecimento modelado.

Pela análise da Figura 4.5 constata-se que ao aquecimento modelado ao longo de um período de 2 horas a 20 °C corresponde uma capacidade de armazenamento estrutural disponível de 10,92 kWh (apresentado pela área a cinzento na Figura 4.2). Já a análise da Figura 4.6 revela que apenas 53,6 % dos 10,92 kWh disponíveis é armazenado sob a forma de calor na estrutura do edifício (apresentado pela área a azul na Figura 4.2), e trata-se do caso mais eficiente. No caso da modelação do aquecimento durante 24 horas a 20 °C, apenas 29,5 % de 65 kWh de  $C_{ADR}$  é armazenado sob a forma de calor. A situação menos eficaz ocorre quando o aquecimento é modelado durante 24 horas a 24 °C em que 22,6 % dos 195,24 kWh é armazenado na estrutura sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.4).

De seguida, apresenta-se a simulação do edifício constituído por paredes envolventes de ETICS com 3 cm de EPS, e com igual quantidade de isolamento térmico na cobertura (Solução Construtiva 2 descrito no Subcapítulo 3.2).

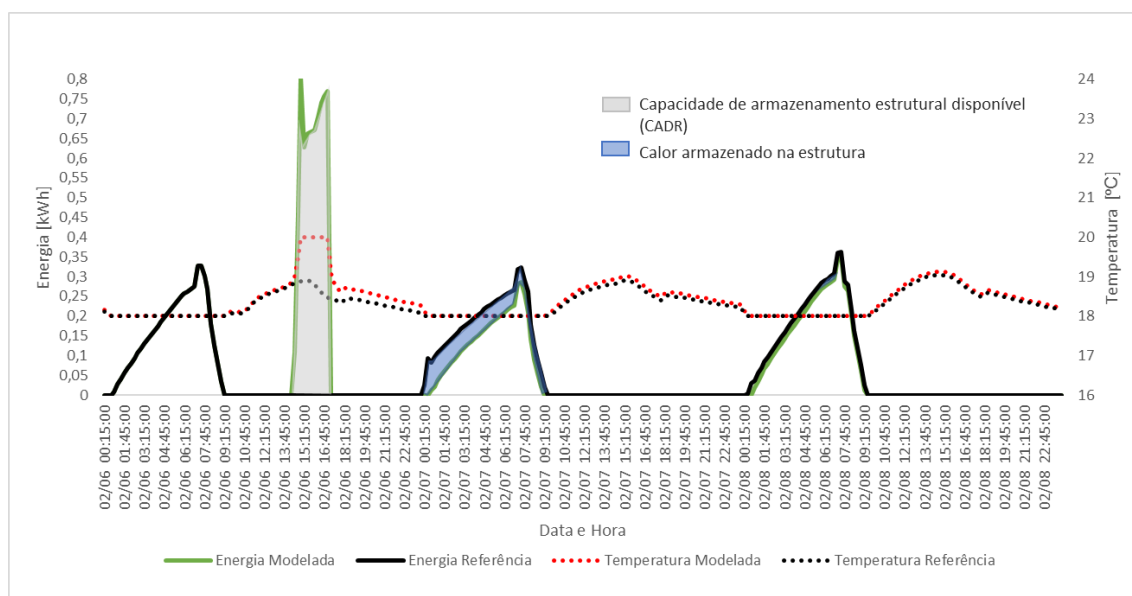


Figura 4.7 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 24 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa.

A Figura 4.7 indica a evolução da temperatura interior através do aumento do aquecimento para 20 °C durante um intervalo de tempo de 2 horas para o caso de paredes exteriores de ETICS com 3 cm de EPS. A análise da figura revela que a energia útil do aquecimento é menor em relação à energia útil na Figura 4.2. Neste caso, existe uma maior independência à climatização para manter a temperatura mínima de conforto, consequentemente a energia térmica armazenada é menor. Através da análise da Figura 4.7 verifica-se que aquecimento é desativado durante 7 horas e 15 minutos depois de ocorrer a simulação.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam a modelação do aquecimento durante um intervalo de tempo de 4 horas a 22 °C e durante um intervalo de tempo de 24 horas a 24 °C. A análise da Figura 4.8 e da Figura 4.9 permite verificar que o aquecimento é desativado após a simulação durante 10 horas e 15 minutos e durante 56 horas e 45 minutos, respetivamente.

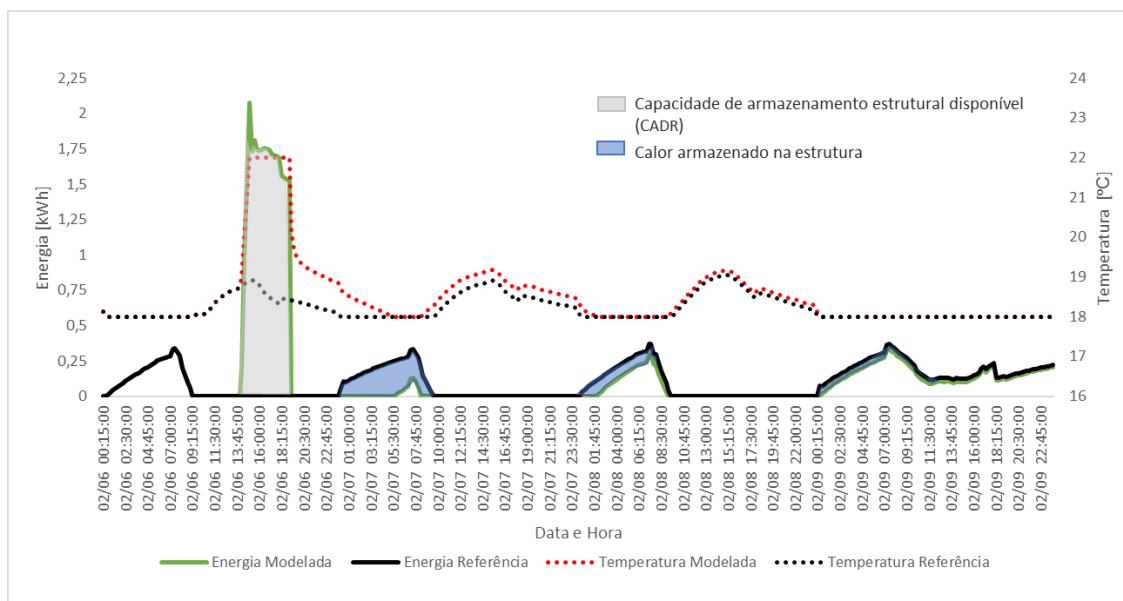


Figura 4.8 – Modelação da temperatura interior durante 4 horas a 22 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa.

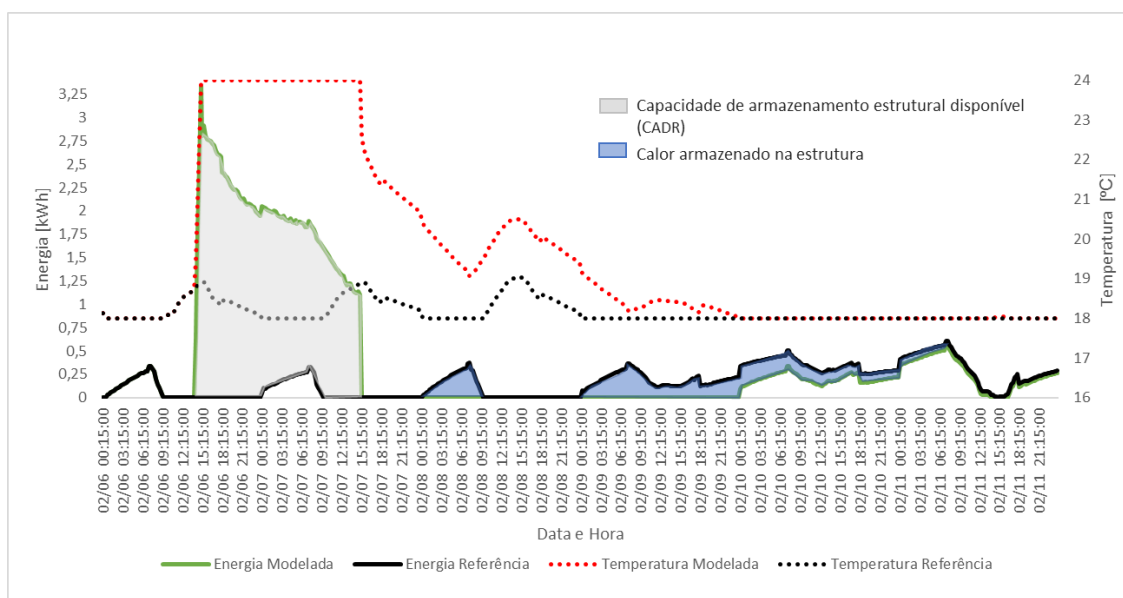


Figura 4.9 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 3 cm EPS, Lisboa.

A análise da Figura 4.10 indica que o valor mínimo da  $C_{ADR}$  é de 6,97 kWh e o valor máximo é de 135,96 kWh.

Através da análise da Figura 4.11 constata-se que o aquecimento modelado durante 2 horas a 20 °C tem 7,3 kWh de capacidade de armazenamento estrutural disponível (apresentado pela área a cinzento na Figura 4.7), e apenas 45,2 % de 7,3 kWh é armazenado sob a forma de calor na estrutura do edifício (apresentado pela área a azul na Figura 4.7). No caso do aquecimento modelado durante 4 horas a 22 °C, apenas 42,2 % de 31,77 kWh da  $C_{ADR}$  é armazenado. O caso mais eficaz ocorre na modelação do aquecimento ao longo de um período de 6 horas a 20 °C, em que 46,9 % de 18,65 kWh é armazenado. A situação menos eficaz ocorre com o aquecimento modelado durante 24 horas a 24 °C, em que 22,2 % de 135,96 kWh, é armazenada na estrutura sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.9).

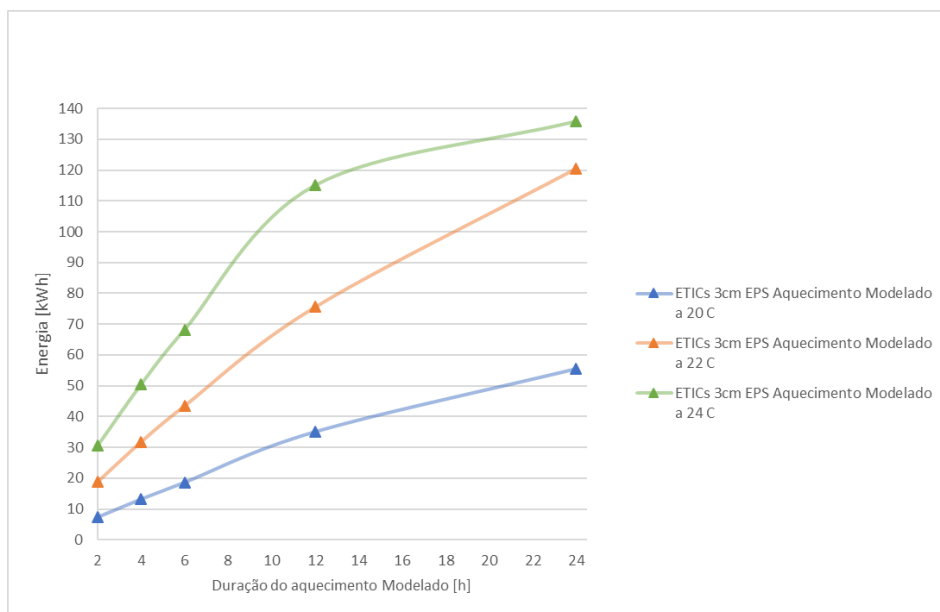


Figura 4.10 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm EPS, Lisboa.

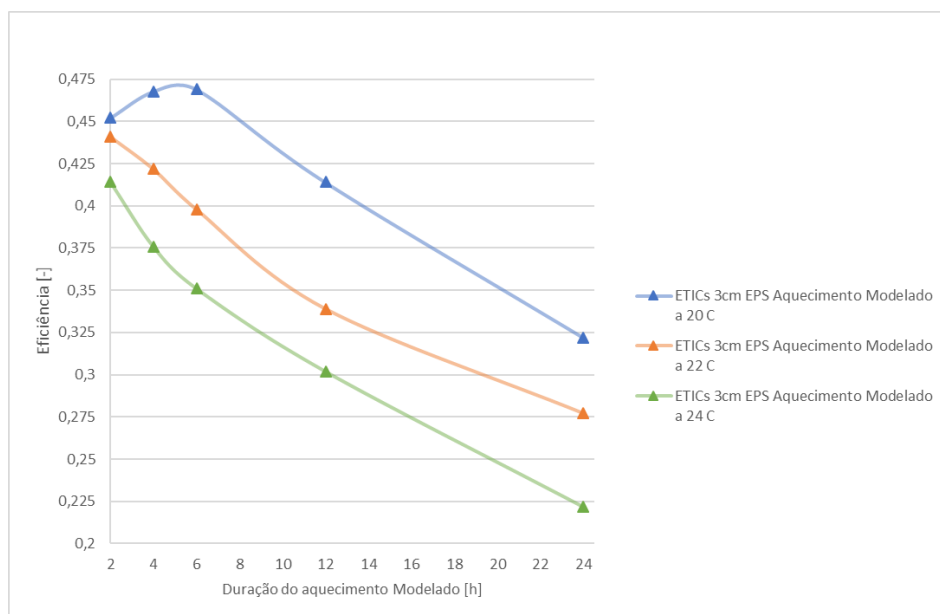


Figura 4.11 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm EPS, Lisboa.

Segue-se o caso de estudo com a Solução Construtiva 3, indicado no subcapítulo 3.2, constituído por paredes envolventes de ETICS com 6 cm de EPS e igual quantidade de isolamento térmico na cobertura.

A modelação da temperatura interior durante um intervalo de tempo de 2 horas a 20 °C para a solução construtiva com ETICS de 6 cm de EPS encontra-se apresentada na Figura 4.12. Através da análise da figura verifica-se que a quantidade de energia útil do aquecimento diminui em relação à solução construtiva de ETICS de 3 cm de EPS, apresentado na Figura 4.7. A análise da Figura 4.12 permite verificar a dependência do edifício face ao aquecimento e constata-se que após a alteração da temperatura interior o aquecimento é desativado durante 9 horas e 30 minutos.

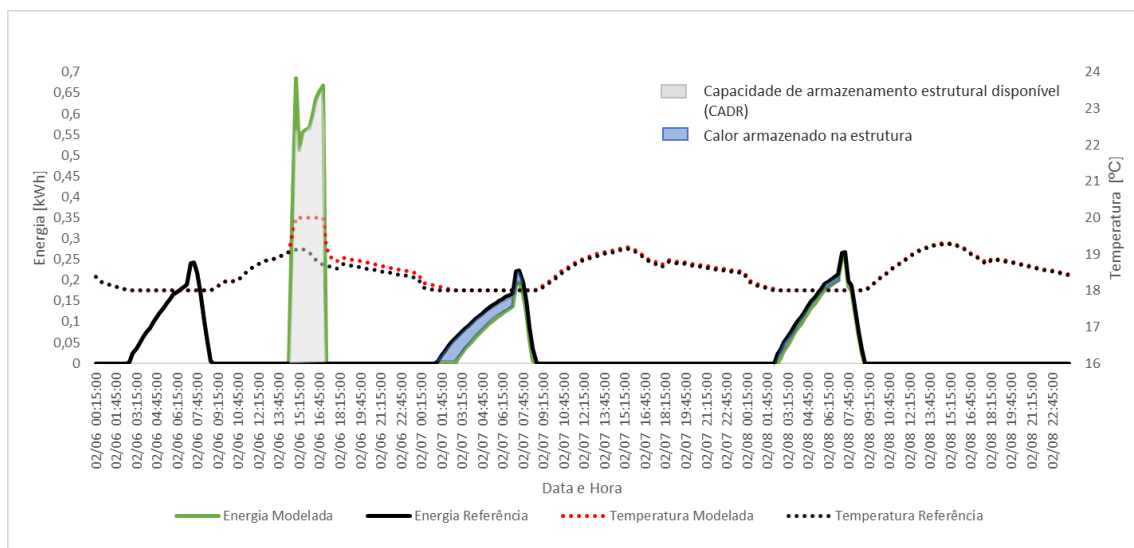


Figura 4.12 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.

A Figura 4.13 apresenta a modelação do aquecimento durante um intervalo de tempo de 12 horas a 20 °C. A análise da figura indica que aquecimento é desligado após a modelação durante 25 horas e 30 minutos.

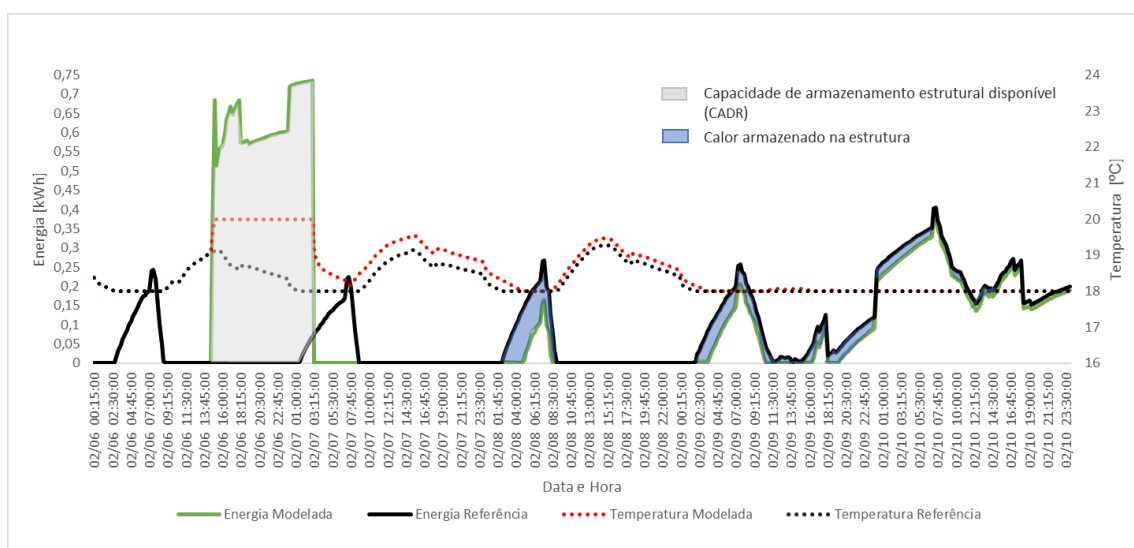


Figura 4.13 – Modelação da temperatura interior durante 12 horas a 20 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.

A Figura 4.14 apresenta a modelação do aquecimento ao longo de um período de 24 horas a 24 °C. A análise da figura revela a autonomia do edifício em relação ao aquecimento durante dois dias e meio (60 horas e 15 minutos).

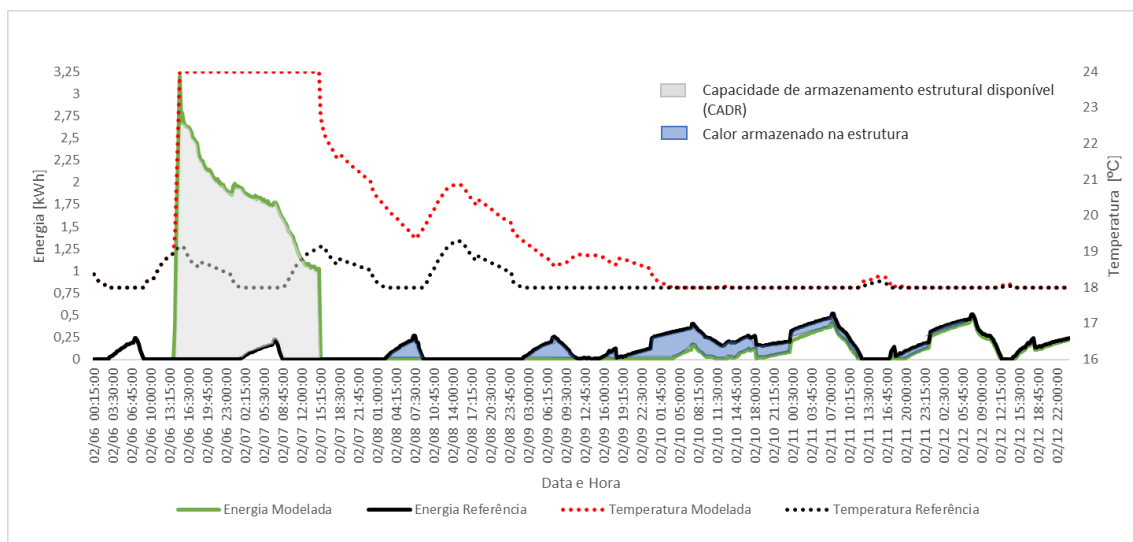


Figura 4.14 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 6 cm EPS, Lisboa.

A análise da Figura 4.15 indica que o valor mínimo da capacidade de armazenamento estrutura disponível é de 5,77 kWh e o valor máximo é de 178,79 kWh.

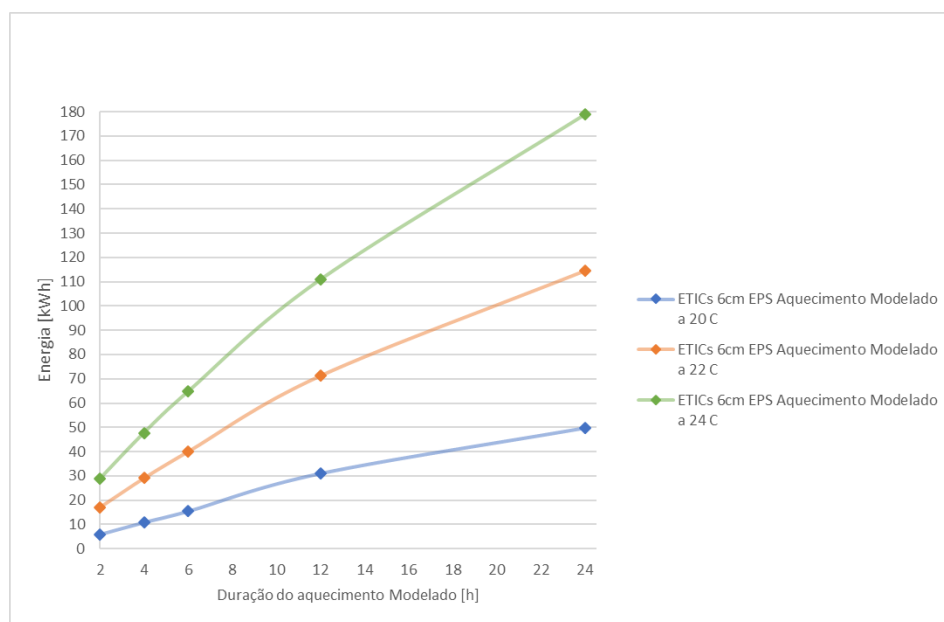


Figura 4.15 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível (CADR) – ETICS 6 cm EPS, Lisboa.

A análise da Figura 4.16 indica que para o aquecimento modelado ao longo de um período de 2 horas a 20 °C a eficiência equivale a 40,6 %, isto é 40,6 % de 5,77 kWh da capacidade de armazenamento é armazenado na estrutura do edifício sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.12). No caso da modelação do aquecimento durante 12 horas a 20 °C, 36,8 % de 31 kWh é armazenado sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.13). O caso mais eficiente ocorre na modelação do aquecimento durante 4 horas a 20 °C, em que 41,4 % de 10,74 kWh é armazenado. A situação menos eficaz ocorre com o aquecimento modelado durante 24 horas a 24 °C, em que 22,3 % de 178,79 kWh, é armazenado na estrutura sob a forma de calor, (apresentado pela área a azul na Figura 4.14).

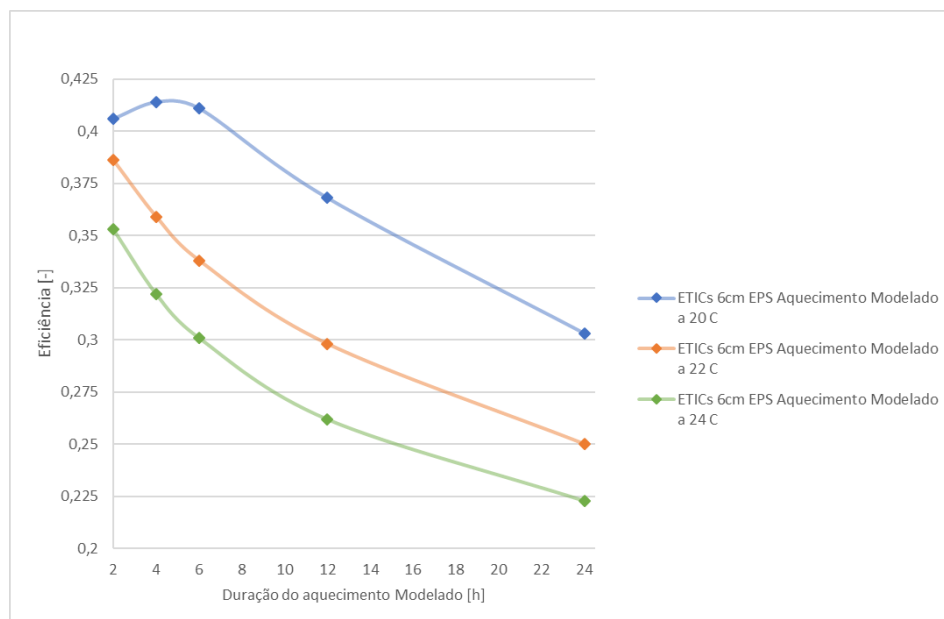


Figura 4.16 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 6 cm EPS, Lisboa.

Por fim, apresenta-se a análise da Solução Construtiva 4 aplicado ao edifício, indicado no subcapítulo 3.2, constituído por paredes envolventes de ETICS com 8 cm de EPS, e igual espessura de isolamento térmico na cobertura.

A Figura 4.17 apresenta a evolução do aquecimento durante um período de 2 horas a 20 °C para o caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS. Esta é a solução construtiva estudada que apresenta menor quantidade de energia útil para o aquecimento relativamente aos casos apresentados na Figura 4.2, na Figura 4.7 e na Figura 4.12. A análise da Figura 4.17 indica que após a modelação da temperatura interior o aquecimento é desligado durante 12 horas.

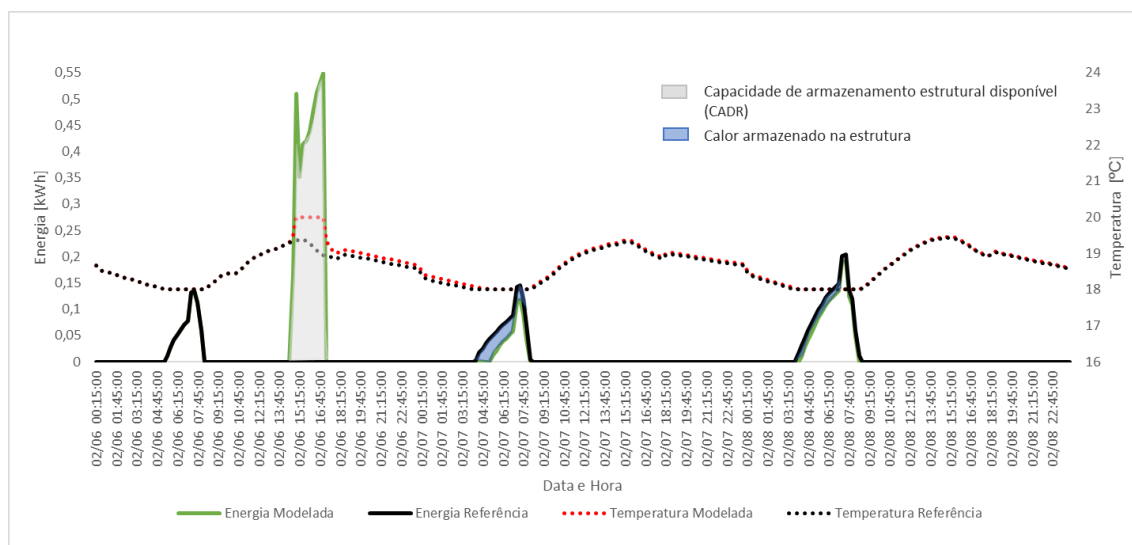


Figura 4.17 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

Através da análise da Figura 4.18, constata-se que após a modelação do aquecimento durante 6 horas a 20 °C o aquecimento é desligado durante 9 horas e 45 minutos.



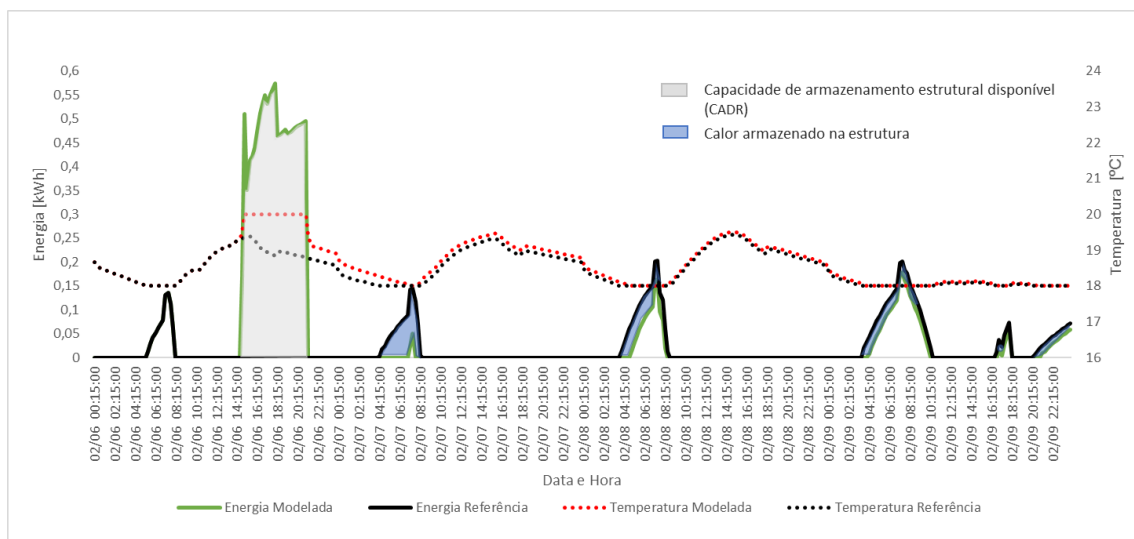


Figura 4.18 – Modelação da temperatura interior durante 6 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

A Figura 4.19 indica que após a modelação do aquecimento durante 24 horas a 24 °C o aquecimento é desligado durante 63 horas (pouco mais de 2 dias e meio).

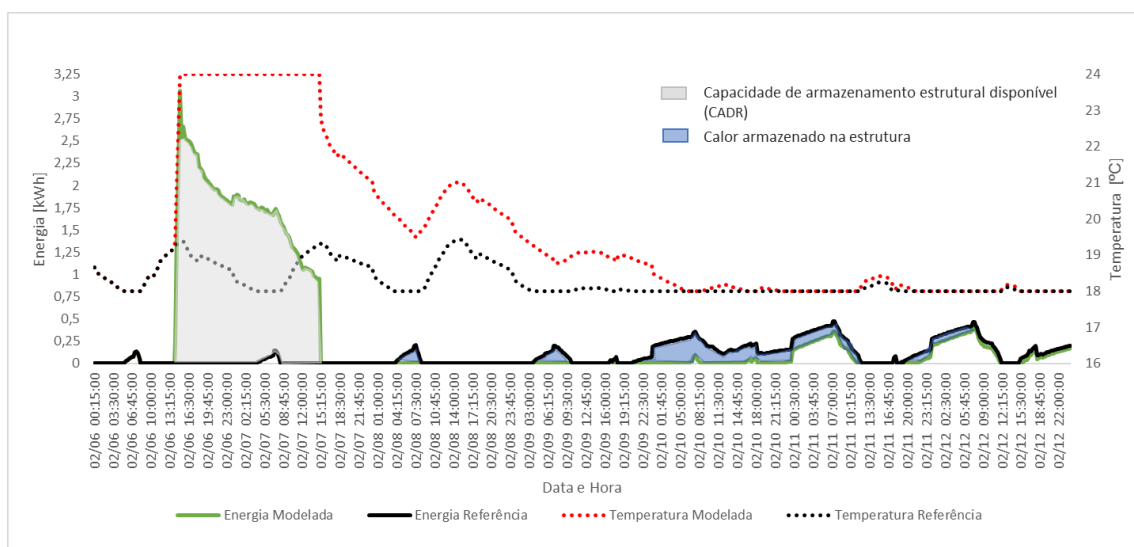


Figura 4.19 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

A análise da Figura 4.20 indica que o valor mínimo da  $C_{ADR}$  é de 4,37 kWh e o valor máximo é de 173,24 kWh. Deste modo, verifica-se a diminuição dos valores da capacidade de armazenamento estrutural com o aumento do isolamento térmico, onde a solução construtiva da parede envolvente simples regista os valores mais elevados (apresentado na Figura 4.5).

A análise da Figura 4.21 indica que o aquecimento modelado durante 2 horas a 20 °C, possui 33,6 % da capacidade de armazenamento de 4,37 kWh armazenada na estrutura do edifício sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.17). Na modelação do aquecimento durante 6 horas a 20 °C, 33,3 % de 12,33 kWh é armazenada sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.18). O caso mais eficiente ocorre na modelação do aquecimento durante 4 horas a 20 °C, em que 34 % de 8,47 kWh é armazenada na estrutura sob a forma de calor. A situação menos eficaz ocorre com o aquecimento modelado durante 24 horas a 24 °C, em que 20,3 % de 173,24 kWh, é armazenada na estrutura sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.19).

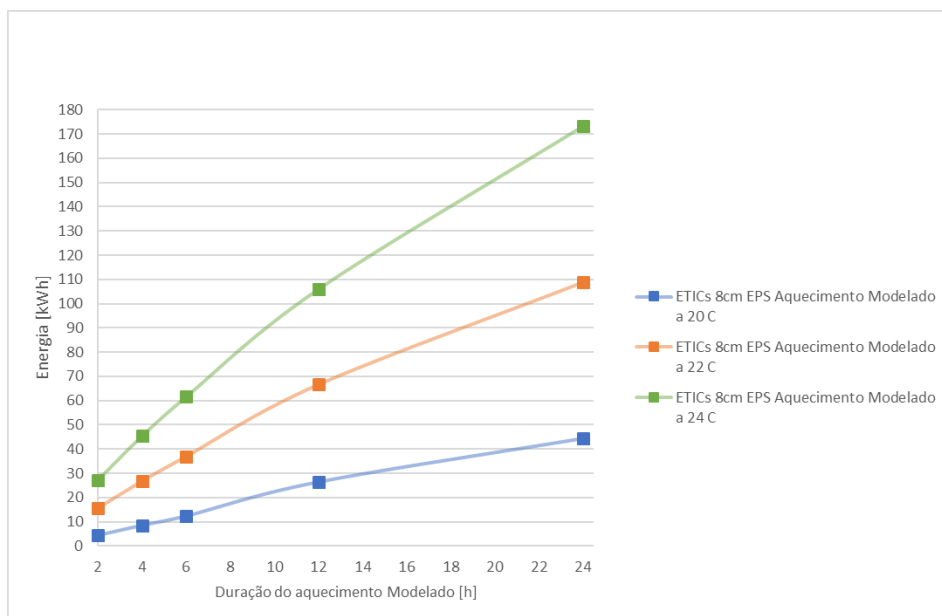


Figura 4.20 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

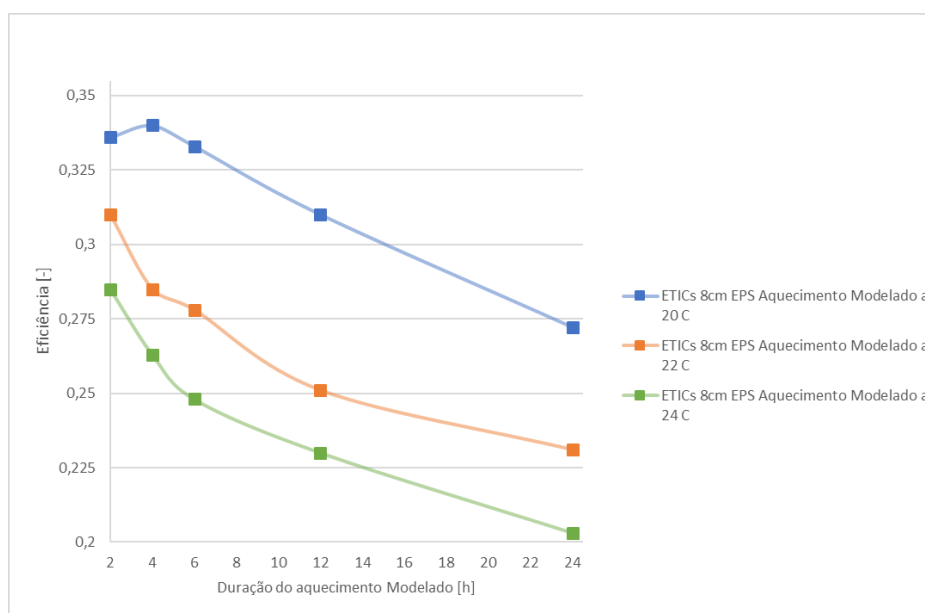


Figura 4.21 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

Através da análise da Figura 4.5, da Figura 4.10, da Figura 4.15 e da Figura 4.20 constata-se que a capacidade média de armazenamento estrutural disponível para o aquecimento modelado durante 2 horas é de 18,6 kWh.

A Figura 4.6, a Figura 4.11, a Figura 4.16 e a Figura 4.21 apresentam valores de eficiência do armazenamento entre 53,6 % e 20,3 %. Constata-se que a eficiência diminui com o aumento da duração e da temperatura da modelação do aquecimento devido às perdas térmicas ao longo do tempo.

A Figura 4.22 apresenta os valores da capacidade de armazenamento estrutural disponível em função dos valores do calor armazenado na estrutura do edifício, em diferentes cenários de ativação do aquecimento, para a solução construtiva de paredes exteriores simples e paredes com ETICS com 8 cm de EPS na zona climática de Lisboa.

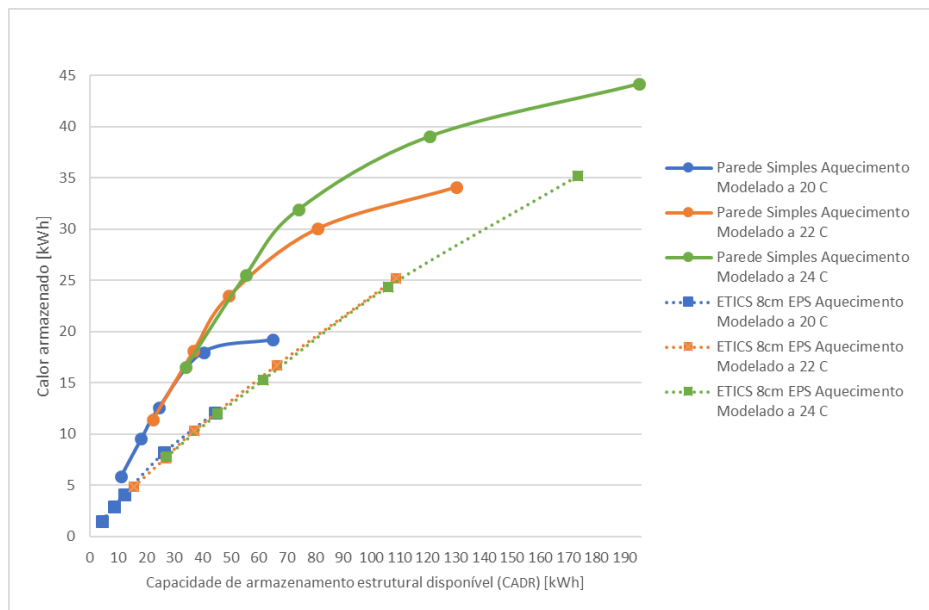


Figura 4.22 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Lisboa.

A análise da Figura 4.22 permite concluir três pontos importantes. O primeiro refere-se ao caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS que apresenta, nos vários cenários da modelação do aquecimento, valores de capacidade de armazenamento estrutural disponível e valores de calor armazenado, menores em relação ao caso com paredes exteriores simples. O caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS é o caso que apresenta maior consistência na proporção de calor armazenado de acordo com o aumento da duração do aquecimento alterado, visto apresentar uma evolução quase linear. Já no caso com paredes exteriores simples, ao fim de 6 horas de modelação do aquecimento, o calor armazenado diminui em relação à proporção inicial.

Com base nos estudos de Le Dréau *et al.* [4], segue-se a análise da Figura 4.23 que indica o intervalo de tempo que é possível reduzir o aquecimento em mais de metade em relação ao valor original/referência para diferentes cenários de armazenamento de calor em Lisboa.

Pela análise da Figura 4.23 constata-se que o aquecimento de referência é reduzido em mais de metade durante mais tempo sempre que o aquecimento é modelado ao longo de um período de 24 horas a 24 °C. Como acontece no caso da solução construtiva com paredes simples, onde o aquecimento de referência é reduzido em mais de metade durante 37 horas e 15 minutos (pouco mais de um dia e meio). Para a solução construtiva de ETICS de 3 cm de EPS a redução máxima do aquecimento em mais de metade ocorre durante 71 horas e 45 minutos (quase 3 dias). Para o ETICS de 6 cm de EPS a redução tem a duração de 80 horas e 45 minutos. Por fim, para o ETICS com 8 cm a redução do aquecimento ocorre durante 82 horas (quase 3 dias e meio). Deste modo, a análise da Figura 4.23 revela que o calor é armazenado durante mais tempo quanto maior é o isolamento térmico na solução construtiva.

Por fim, a Figura 4.24 apresenta um gráfico que resume todos os cenários da modelação do aquecimento e indica a sua autonomia relativamente ao aquecimento após a respetiva modelação. Através da análise da Figura 4.24 constata-se que o aquecimento pode ser desligado até um máximo de 70 horas, aproximadamente 3 dias, para a solução construtiva com mais isolamento térmico e até 33 horas e 30 minutos para a solução construtiva com paredes envolventes simples.

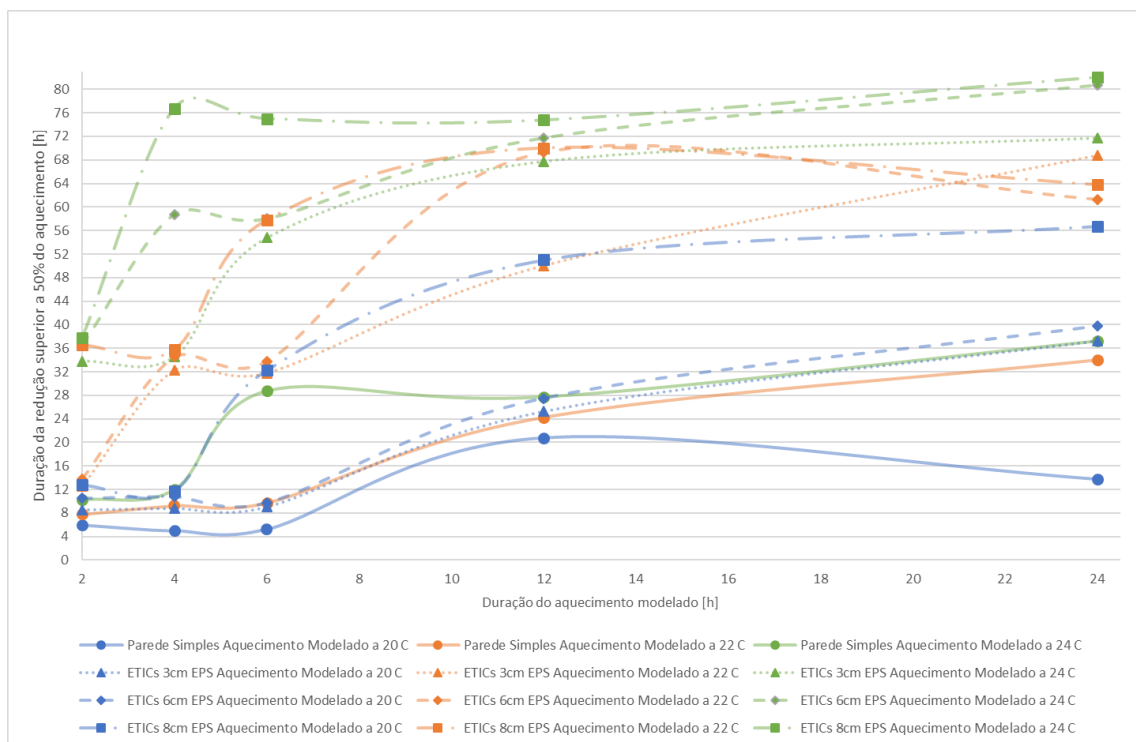


Figura 4.23 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Lisboa.

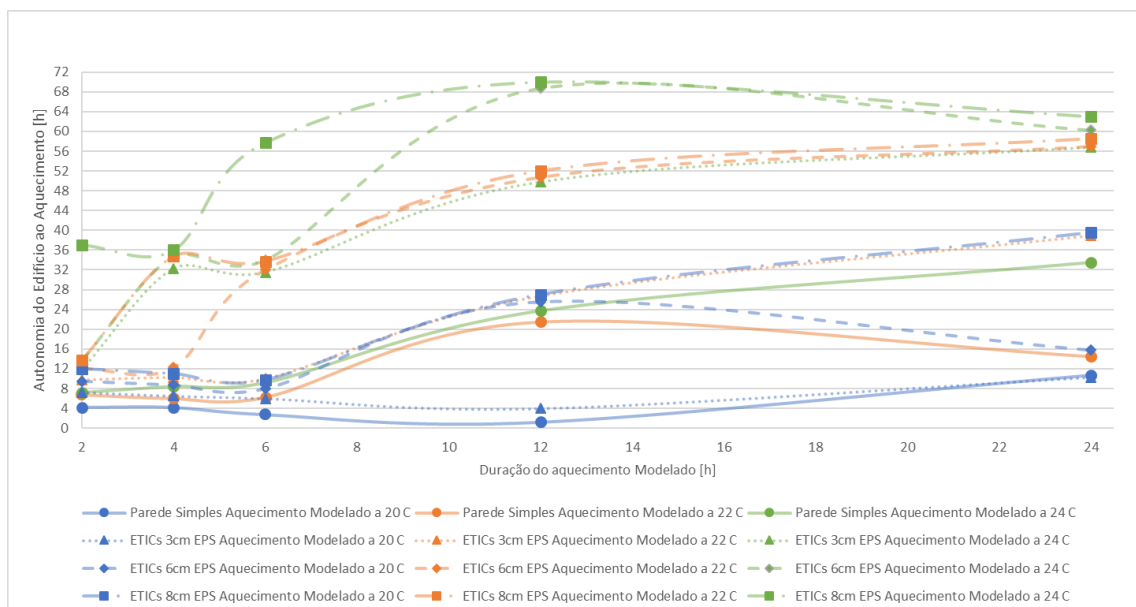


Figura 4.24 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Lisboa.

Com base nos resultados da autonomia apresentados na Figura 4.24 aliados aos resultados da eficiência obtidos neste subcapítulo, é possível concluir que o aquecimento modelado por mais de 6 horas apresenta intervalos de autonomia maiores, no entanto, possui uma drástica diminuição da eficiência devido às perdas de calor por transmissão.

## 4.2. Zona Climática de Bragança

No presente subcapítulo, apresenta-se o caso de estudo aplicado às condições atmosféricas de Bragança para cada solução construtiva. A Figura 4.25 apresenta as temperaturas interiores do edifício com diferentes soluções construtivas para três dias representativos da estação de aquecimento. Na solução construtiva com paredes exteriores simples as temperaturas variam entre os 13 e 15,4 °C, enquanto que a solução construtiva com mais isolamento térmico, ETICS com 8 cm de EPS, tem temperaturas entre os 15,4 e 17,8 °C. As temperaturas testadas em Bragança são, portanto, mais baixas em relação a Lisboa (apresentado na Figura 4.1).

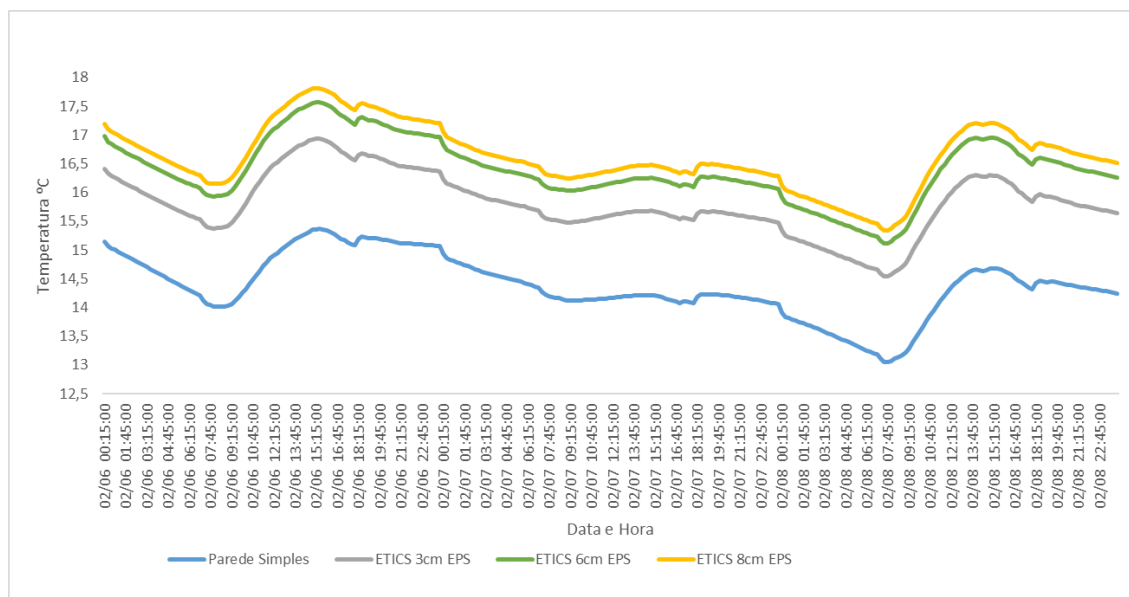


Figura 4.25 – Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento em Bragança.

A Tabela 4.2 indica as necessidades de aquecimento em Bragança para três dias representativos da estação de aquecimento (6 a 8 de fevereiro), onde as temperaturas mínimas de conforto são mantidas. A solução construtiva com mais isolamento térmico apresenta uma redução do aquecimento em 64,5 % face à solução construtiva com paredes exteriores simples. A análise da tabela indica que Bragança apresenta necessidades de aquecimento maiores do que em Lisboa (apresentada na Tabela 4.1).

Tabela 4.2 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento em Bragança.

Solução Construtiva	Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento: Bragança [kWh]
Parede Simples	236,10
ETICS 3 cm EPS	133,14
ETICS 6 cm EPS	100,37
ETICS 8 cm EPS	88,58

De seguida, realiza-se a análise dos resultados obtidos nas simulações do edifício constituído por paredes envolventes simples sem isolamento térmico na cobertura (Solução Construtiva 1 descrito no Subcapítulo 3.2), e com a solução constituída por paredes envolventes de ETICS com 8 cm de EPS e igual espessura de isolamento térmico na cobertura (Solução

Construtiva 4 indicado no Subcapítulo 3.2), de modo a resumir os resultados da presente zona climática.

A Figura 4.26 apresenta a modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C para a solução construtiva com paredes simples em Bragança. Através da análise da figura constata-se que o calor armazenado na estrutura do edifício não permite a desativação do ar condicionado, ao contrário da zona climática de Lisboa (apresentado na Figura 4.2). No entanto, a análise da Figura 4.26 indica que o aquecimento após a modelação é reduzido em pelo menos mais de 50 % em relação ao aquecimento de referência durante 30 minutos (entre as 17:15 e as 17:45 horas do dia 6 de fevereiro, apresentado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

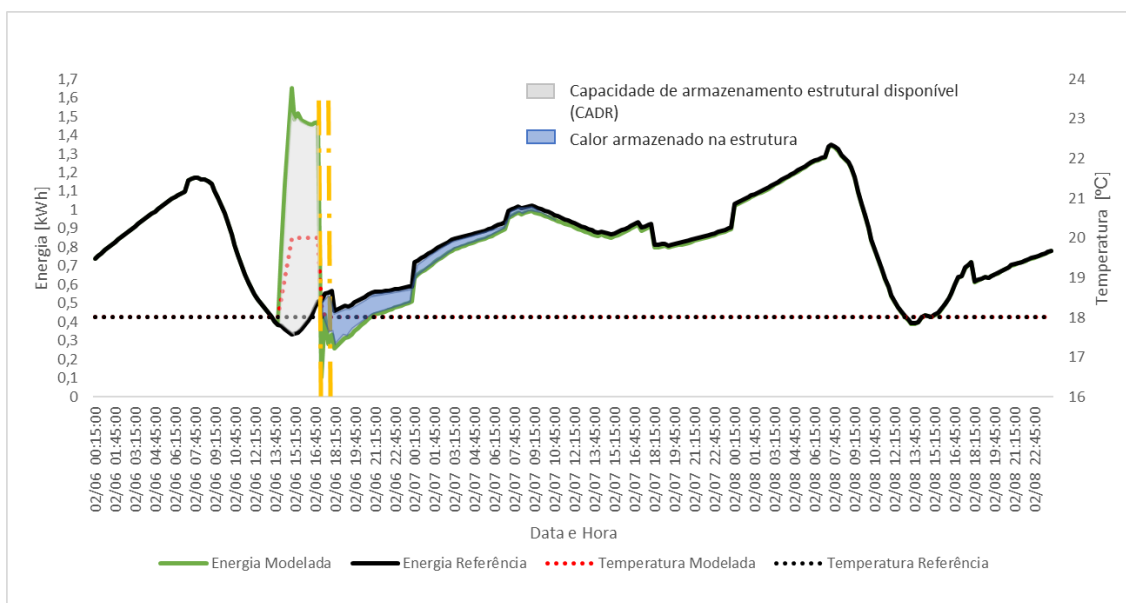


Figura 4.26 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Bragança.

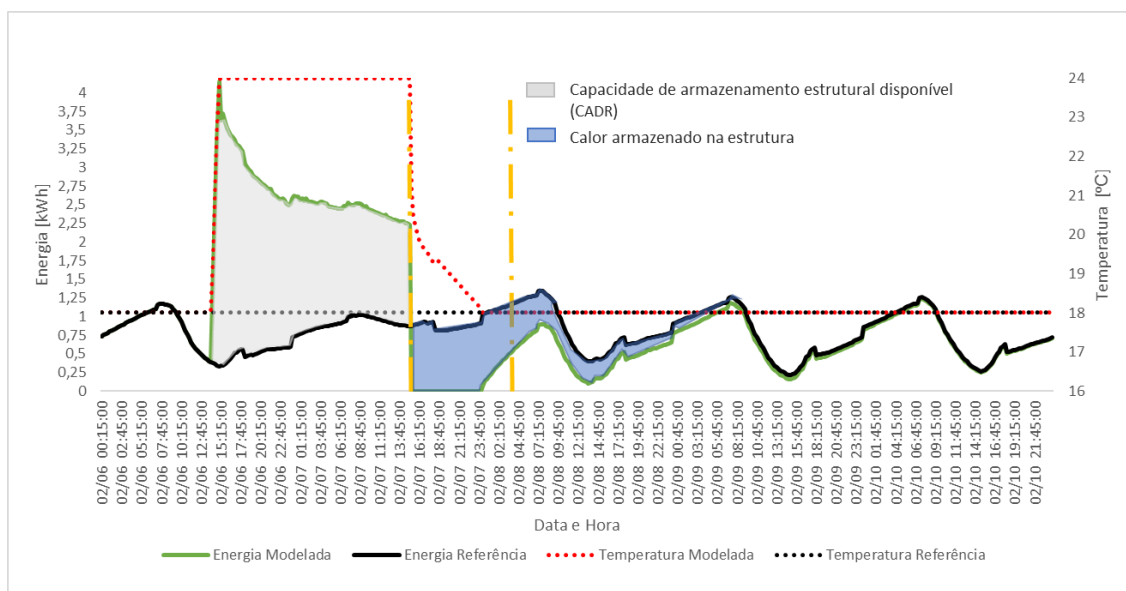


Figura 4.27 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Bragança.

A Figura 4.27 apresenta a modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C para a solução construtiva com paredes simples. Através da análise da figura constata-se que o aquecimento é desativado após o fim da modelação durante 8 horas e 45 minutos (entre as 15:15 e as 24:00 horas do dia 7 de fevereiro). E o aquecimento é reduzido em mais de 50 %, em relação

ao aquecimento de referência, durante 13 horas e 15 minutos após a modelação (entre as 15:15 do dia 7 e as 04:30 horas do dia 8 de fevereiro, indicado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

A Figura 4.28 apresenta a modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C para a solução construtiva com ETICS de 8 cm de EPS. A figura revela que o calor armazenado permite a desativação do ar condicionado durante 5 horas e 15 minutos (entre as 17:15 e as 22:30 do dia 6 de fevereiro). E o aquecimento é reduzido em mais de 50 %, em relação ao aquecimento de referência, durante 6 horas e 45 minutos após a modelação (entre as 17:15 e as 24:00 horas do dia 6 de fevereiro, indicado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

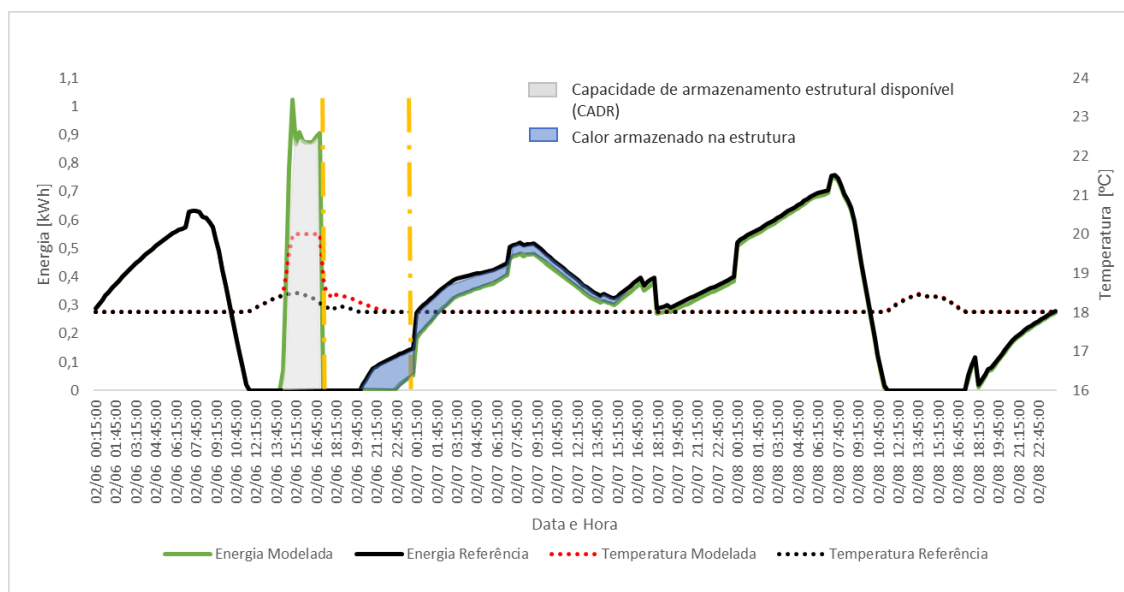


Figura 4.28 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Bragança.

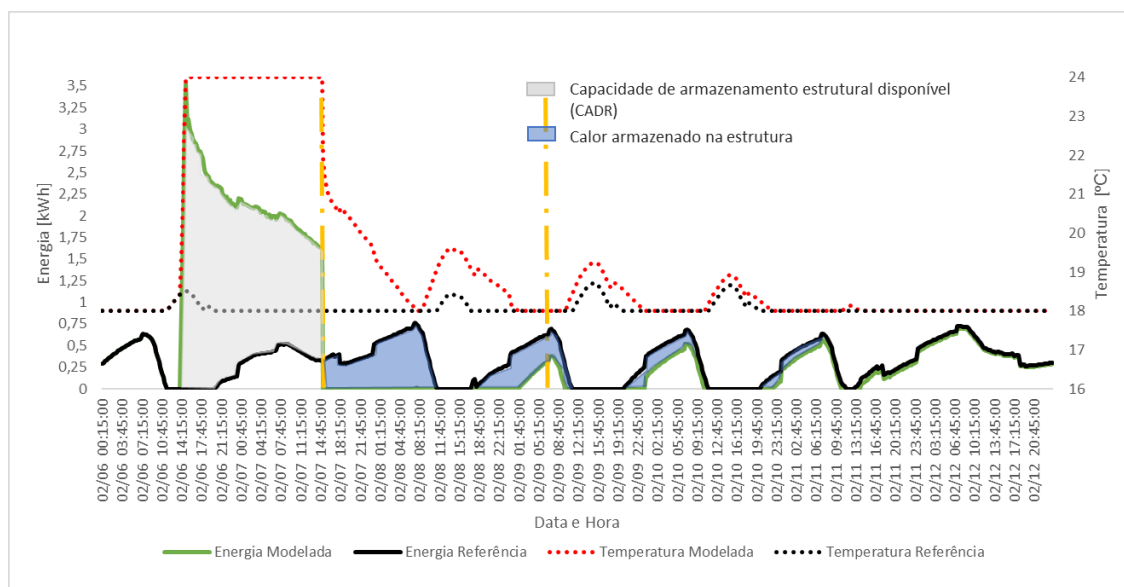


Figura 4.29 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Bragança.

A Figura 4.29 apresenta a modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C para a solução construtiva com ETICS com 8 cm de EPS. A análise da figura indica que o aquecimento é desativado após a modelação durante 16 horas (entre as 15:15 e as 07:15 horas do dia 7 e 8 de fevereiro, respetivamente). E o aquecimento é reduzido em mais de 50 %, em

relação ao aquecimento de referência, durante 39 horas e 45 minutos após a modelação (entre as 15:15 do dia 7 e as 07:00 horas do dia 9 de fevereiro, indicado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

Através da análise da Figura 4.30 verifica-se que a capacidade de armazenamento estrutural disponível das soluções construtivas apresentadas neste subcapítulo diferem pouco, no entanto, o ETICS com 8 cm de EPS apresenta valores ligeiramente inferiores, com valores entre 9,4 kWh e 189 kWh, relativamente à solução construtiva com parede exteriores simples, que verifica valores entre 12 kWh e 191,6 kWh.

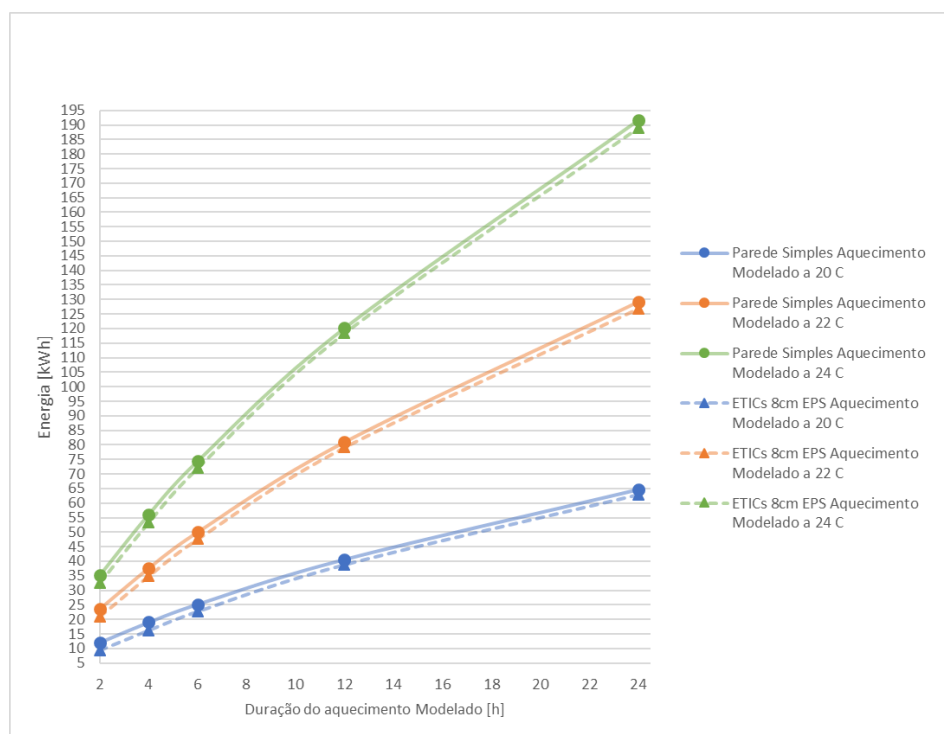


Figura 4.30 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Bragança.

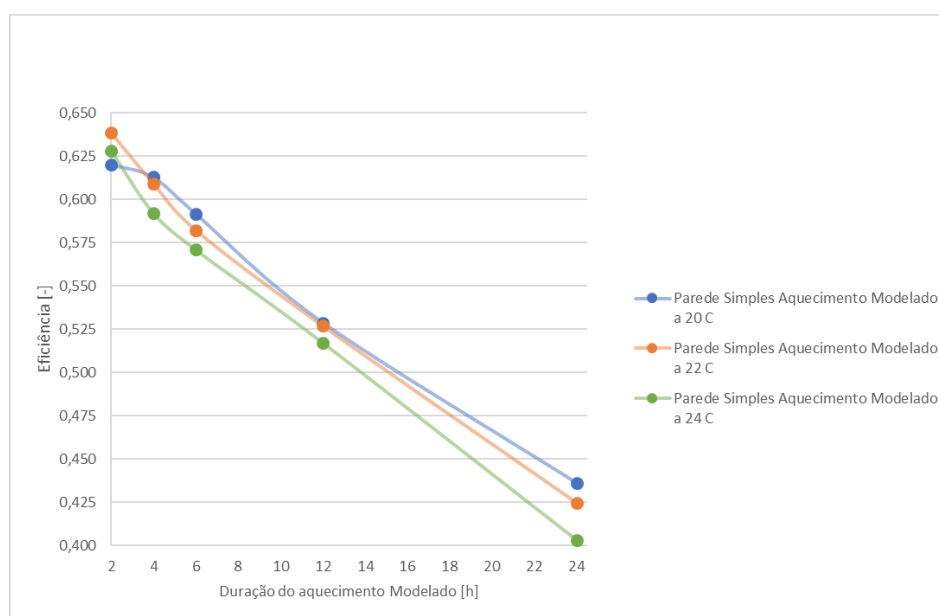


Figura 4.31 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede simples, Bragança.



A Figura 4.31 apresenta a eficiência do armazenamento para a solução construtiva com paredes simples. A análise da Figura 4.31 indica que o aquecimento modelado durante 2 horas a 20 °C verifica que 62 % de 12 kWh é armazenado sob a forma de calor na estrutura do edifício (apresentado na Figura 4.26 pela área a azul). No caso do aquecimento modelado durante 24 horas a 24 °C, apenas 40,3 % de 191,6 kWh da  $C_{ADR}$  é armazenado na estrutura do edifício (indicado pela área a azul na Figura 4.27), e trata-se do caso menos eficiente. O caso mais eficaz ocorre na modelação do aquecimento durante 2 horas a 22 °C, onde 63,9 % de 23,6 kWh é armazenado sob a forma de calor.

Por fim, a Figura 4.32 apresenta a eficiência do armazenamento para a solução construtiva com ETICS com 8 cm de EPS. A análise da figura indica que o aquecimento ao longo de um período de 2 horas a 20 °C equivale a 62,2 % de eficiência, isto é, 62,2% de 9,4 kWh é armazenado sob a forma de calor (apresentado pela área a azul na Figura 4.28). No caso da modelação do aquecimento durante 24 horas a 24 °C, verifica-se que 40,7 % e 189 kWh é armazenado sob a forma de calor na estrutura (indicado pela área a azul na Figura 4.29), e trata-se do caso menos eficiente. E o caso mais eficaz ocorre na modelação do aquecimento durante 6 horas a 20 °C, que verifica uma eficiência de 64,4 % e 22,7 kWh de  $C_{ADR}$ .

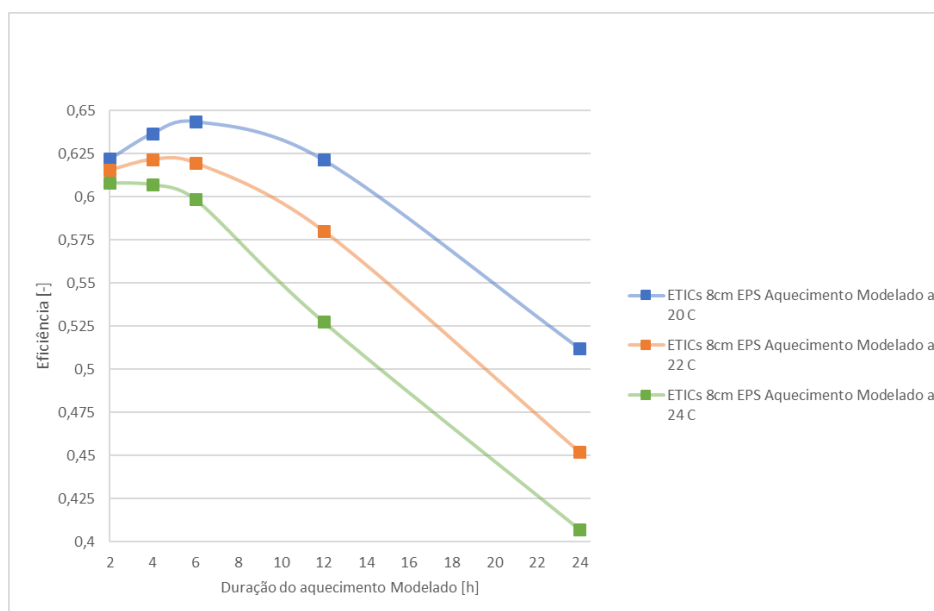


Figura 4.32 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Bragança.

Uma vez que a zona climática de Bragança possui temperaturas mais baixas em relação à zona climática de Lisboa, é possível identificar com mais facilidade as diferenças nos gráficos da eficiência entre as soluções construtivas ilustradas na Figura 4.31 e na Figura 4.32. Através da análise das figuras constata-se que a eficiência diminui de forma proporcional com o aumento da duração do aquecimento modelado para o caso com paredes simples. No caso da solução construtiva com ETICS com 8 cm de EPS a eficiência aumenta durante pelo menos 6 horas de modelação do aquecimento. As figuras apresentam valores de eficiência do armazenamento entre 64,4 % e 40,3 %.

A Figura 4.33 apresenta os valores da capacidade de armazenamento estrutural disponível em função dos valores do calor armazenado na estrutura do edifício, em diferentes cenários de ativação do aquecimento, para a solução construtiva de paredes exteriores simples e paredes com ETICS com 8 cm de EPS na zona climática de Bragança.

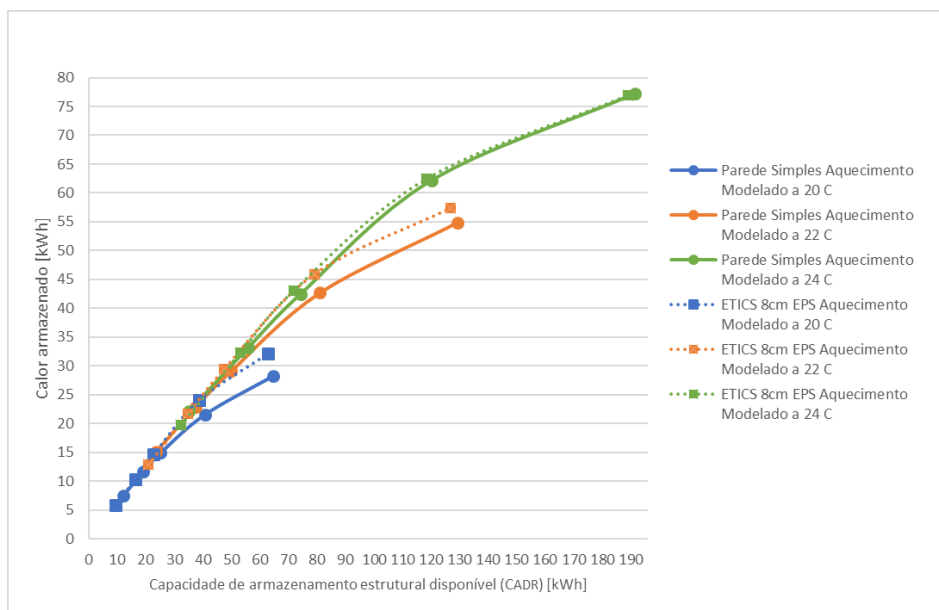


Figura 4.33 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Bragança.

A análise da Figura 4.33 permite apontar as seguintes conclusões. Ambos os casos apresentam valores de capacidade de armazenamento estrutural semelhantes, no entanto, o caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS apresenta valores de calor armazenado superiores em relação ao caso com paredes simples. E ambos os casos a partir de 6 horas de alteração do aquecimento diminuem a proporção inicial de calor armazenado.

A Figura 4.34 ilustra o resumo da duração da redução do aquecimento de referência em mais de metade para as quatro soluções construtivas. Após a análise da figura constata-se que em Bragança a duração máxima da redução do aquecimento é de 39 horas e 45 minutos para a solução construtiva com mais isolamento térmico.

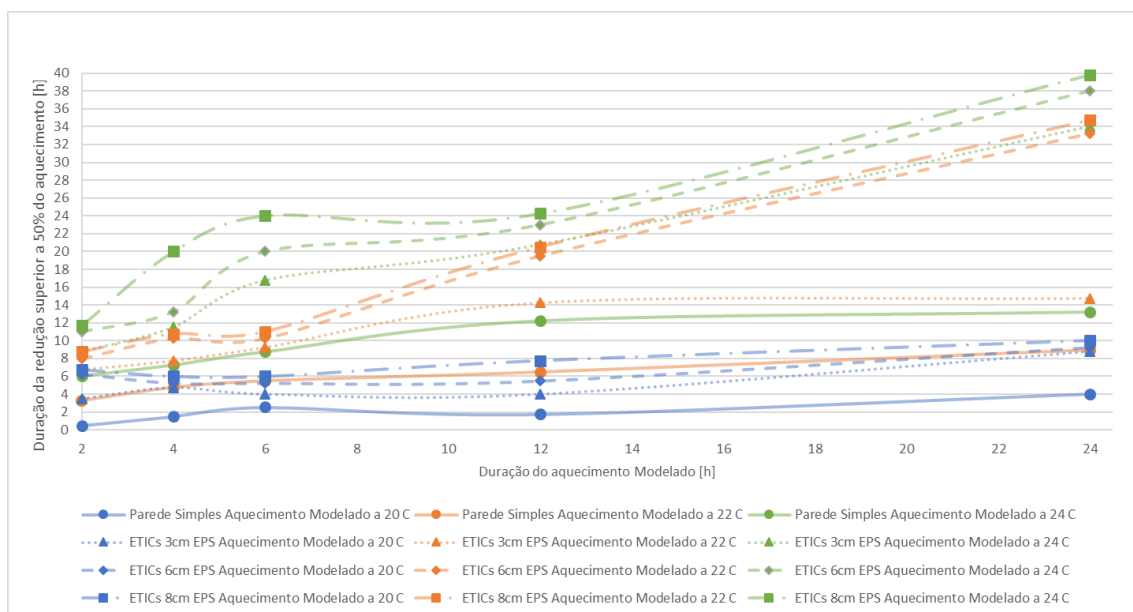


Figura 4.34 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Bragança.

Em sequência dos resultados apresentados na Figura 4.23 do subcapítulo 4.1 e na Figura 4.34, conclui-se que o calor é armazenado durante mais tempo quanto maior é a quantidade de isolamento térmico.

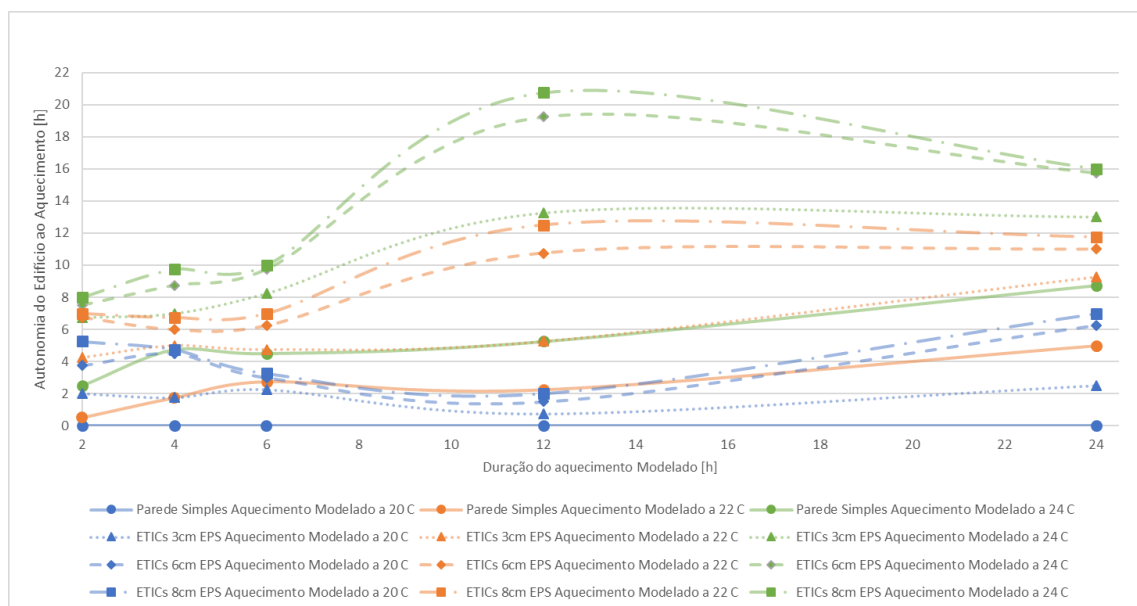


Figura 4.35 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor em Bragança.

Através da análise da Figura 4.35, verifica-se que o edifício fica autónomo em relação ao aquecimento no máximo durante 20 horas e 45 minutos, para a solução construtiva com mais isolamento térmico e até 8 horas e 45 minutos para a solução construtiva com paredes envolventes simples. Os resultados na Figura 4.35 são muito inferiores quando comparados com os resultados obtidos na zona climática de Lisboa onde existem temperaturas superiores (apresentado no Subcapítulo 4.1 na Figura 4.24).

### 4.3. Zona Climática do Porto

Por fim, este subcapítulo apresenta o caso de estudo aplicado às condições atmosféricas do Porto para cada solução construtiva. A Figura 4.36 apresenta as temperaturas interiores do edifício com diferentes soluções construtivas para três dias representativos da estação de aquecimento. Na solução construtiva com paredes exteriores simples as temperaturas variam entre os 15,3 e 18,1 °C, enquanto que a solução construtiva com mais isolamento térmico, ETICS com 8 cm de EPS, tem temperaturas entre os 17 e 19,8 °C. As temperaturas na zona climática do Porto são muito próximas das temperaturas da zona climática de Lisboa (apresentado no subcapítulo 4.1 na Figura 4.1).

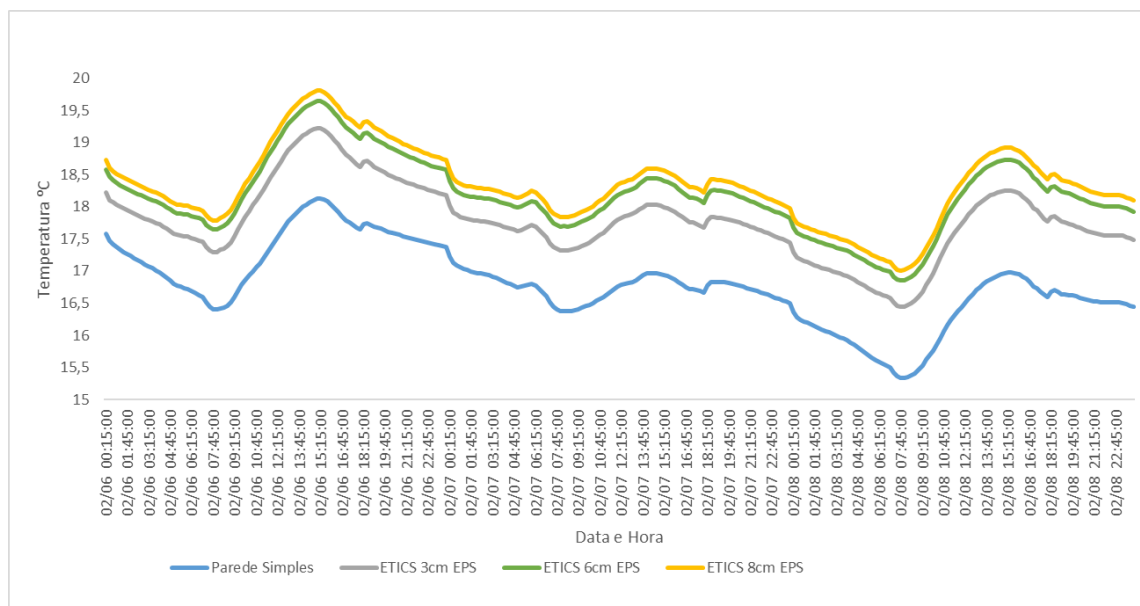


Figura 4.36 – Temperaturas interiores sem aquecimento para a estação de aquecimento no Porto.

A Tabela 4.3 apresenta as necessidades de aquecimento no Porto para os três dias representativos da estação de aquecimento (6 a 8 de fevereiro), onde as temperaturas mínimas de conforto são mantidas. Através da análise da tabela constata-se que a solução construtiva com mais isolamento térmico apresenta uma redução do aquecimento em 87,9 % em relação à solução construtiva com paredes exteriores simples. E verifica-se que as necessidades de aquecimento são ligeiramente mais elevadas no Porto do que em Lisboa (apresentado no Subcapítulo 4.1 na Tabela 4.1).

Tabela 4.3 – Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento no Porto.

Solução Construtiva	Necessidades de Aquecimento em três dias representativos da estação de aquecimento: Porto [kWh]
Parede Simples	95,10
ETICS 3 cm EPS	34,48
ETICS 6 cm EPS	15,92
ETICS 8 cm EPS	11,55

De seguida, realiza-se a análise dos resultados obtidos nas simulações do edifício constituído por paredes envolventes simples sem isolamento térmico, (Solução Construtiva 1 descrito no Subcapítulo 3.2) e com o caso composto por paredes envolventes de ETICS com 8

cm de EPS, e igual espessura de isolamento térmico na cobertura, (Solução Construtiva 4 indicado no Subcapítulo 3.2), de modo a resumir os resultados da zona climática do Porto.

A Figura 4.37 apresenta a modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C para a solução construtiva com paredes simples. A análise da figura revela que o aquecimento é desativado após a modelação durante 5 horas e 30 minutos. E o aquecimento é reduzido em pelo menos 50 % em relação ao aquecimento de referência durante 6 horas e 45 minutos após a modelação (entre as 17:15 e as 24:00 horas do dia 6 de fevereiro, ilustrado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

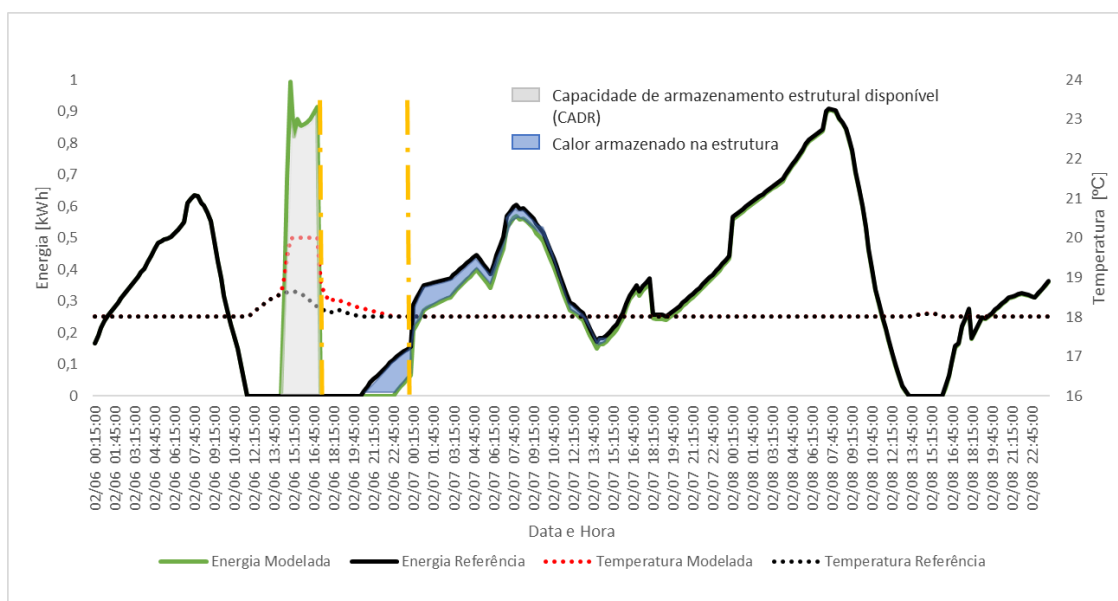


Figura 4.37 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: Parede Simples, Porto.

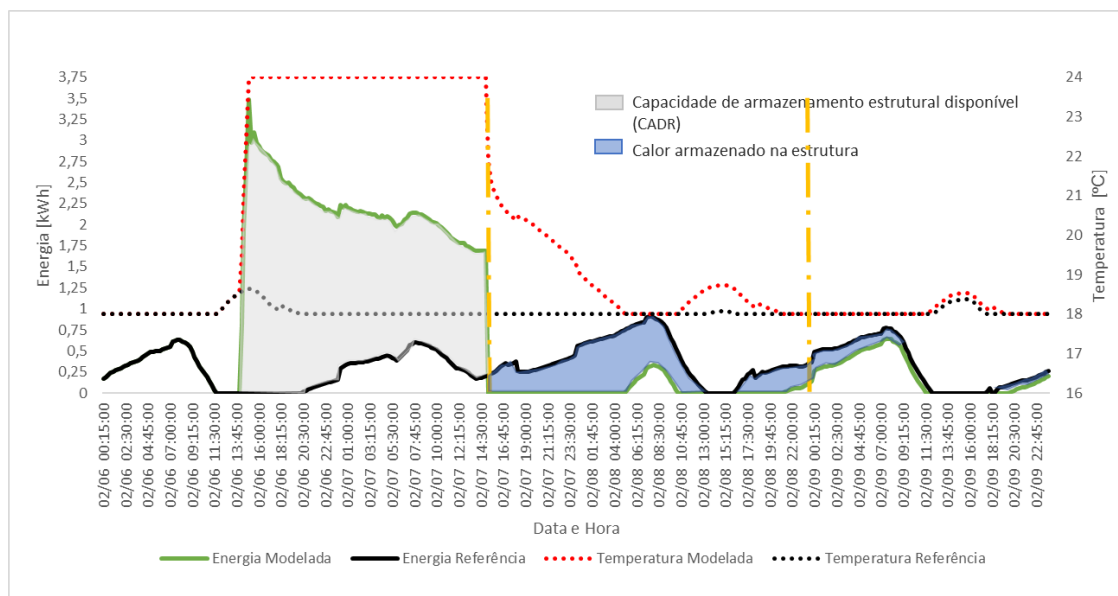


Figura 4.38 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: Parede Simples, Porto.

A Figura 4.38 apresenta a modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C para a solução construtiva com paredes simples. A análise da figura indica que o aquecimento é desativado após a modelação durante 13 horas e 45 minutos (entre as 15:15 e as 05:00 horas do dia 7 e 8 de fevereiro, respetivamente). E o aquecimento é reduzido em pelo menos 50 % em relação ao aquecimento de referência durante 32 horas e 45 minutos após a modelação (entre

as 15:15 do dia 7 e as 24:00 horas do dia 8 de fevereiro, ilustrado na Figura 4.38 pelas linhas verticais a amarelo).

A análise da Figura 4.39 indica que a solução construtiva com paredes envolventes simples possui valores de capacidade de armazenamento estrutural entre 8,96 kWh e 193,83 kWh.

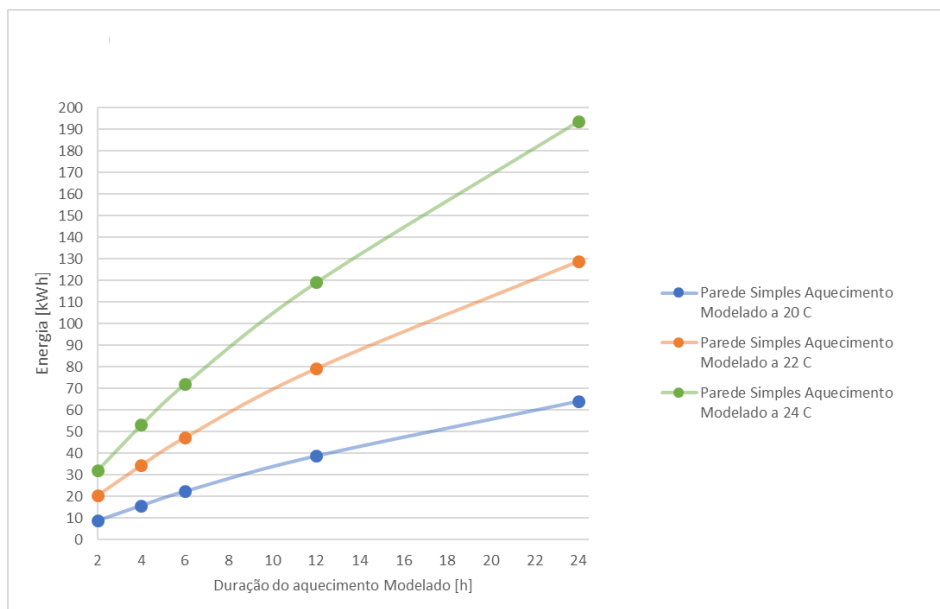


Figura 4.39 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – Parede simples, Porto.

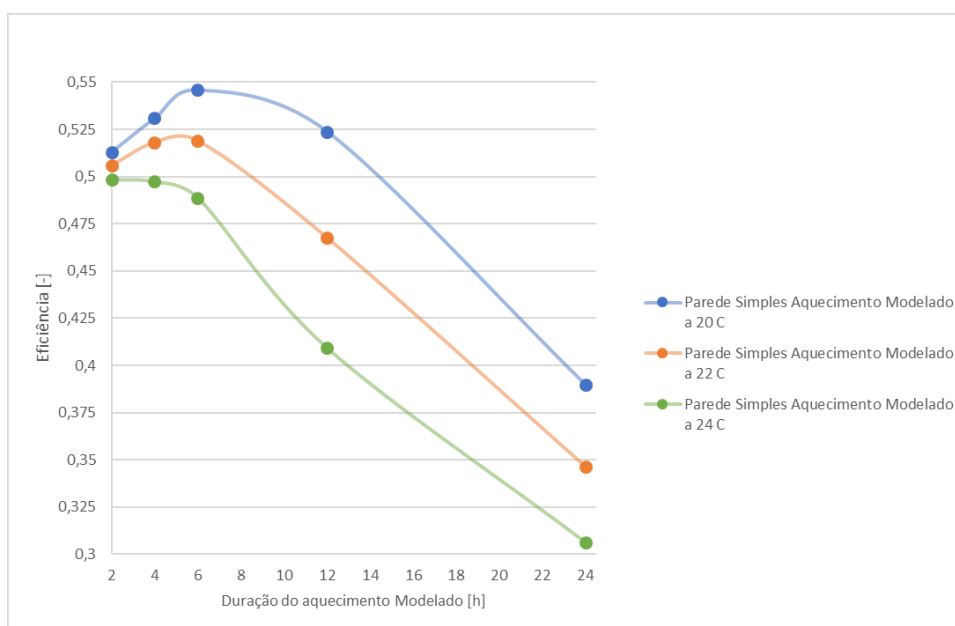


Figura 4.40 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – Parede simples, Porto.

A Figura 4.40 apresenta a eficiência do armazenamento para a solução construtiva com paredes simples. A análise da figura revela que o aquecimento ao longo de um período de 2 horas a 20 °C, 51,3 % de 8,96 kWh é armazenado sob a forma de calor (apresentado na Figura 4.37 pela área a azul). Já na modelação do aquecimento durante 24 horas a 24 °C, apenas 30,6 % de 193,83 kWh da  $C_{ADR}$  é armazenado (apresentado na Figura 4.38 pela área a azul), e trata-se do caso menos eficiente. O caso mais eficaz ocorre na modelação do aquecimento

durante 6 horas a 20 °C, onde 54,6 % de 22,5 kWh é armazenado sob a forma de calor na estrutura do edifício.

A Figura 4.41 apresenta a modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C, agora para a solução construtiva com ETICS de 8 cm de EPS. A análise da figura revela que o calor armazenado permite a desativação do aquecimento durante 13 horas e 45 minutos (entre as 17:15 e as 07:00 horas do dia 6 e 7 de fevereiro, respetivamente). E o aquecimento é reduzido em pelo menos 50 % em relação ao aquecimento de referência durante 14 horas após a modelação (entre as 17:15 e as 07:15 horas do dia 6 e 7 de fevereiro respetivamente, indicado na Figura 4.41 pelas linhas verticais a amarelo).

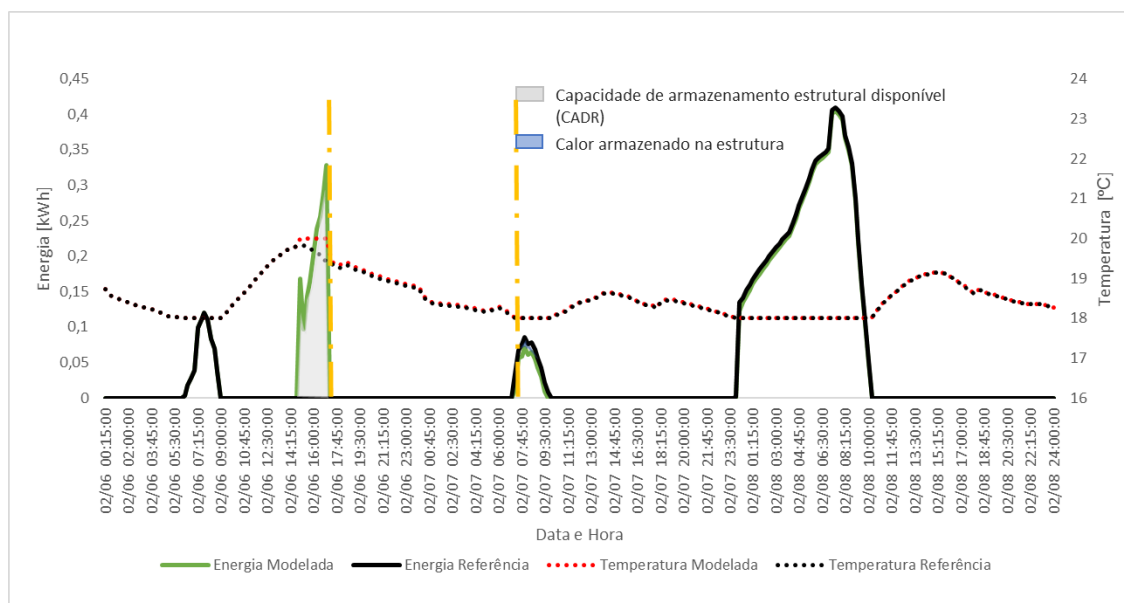


Figura 4.41 – Modelação da temperatura interior durante 2 horas a 20 °C: ETICS 8 cm EPS, Porto.

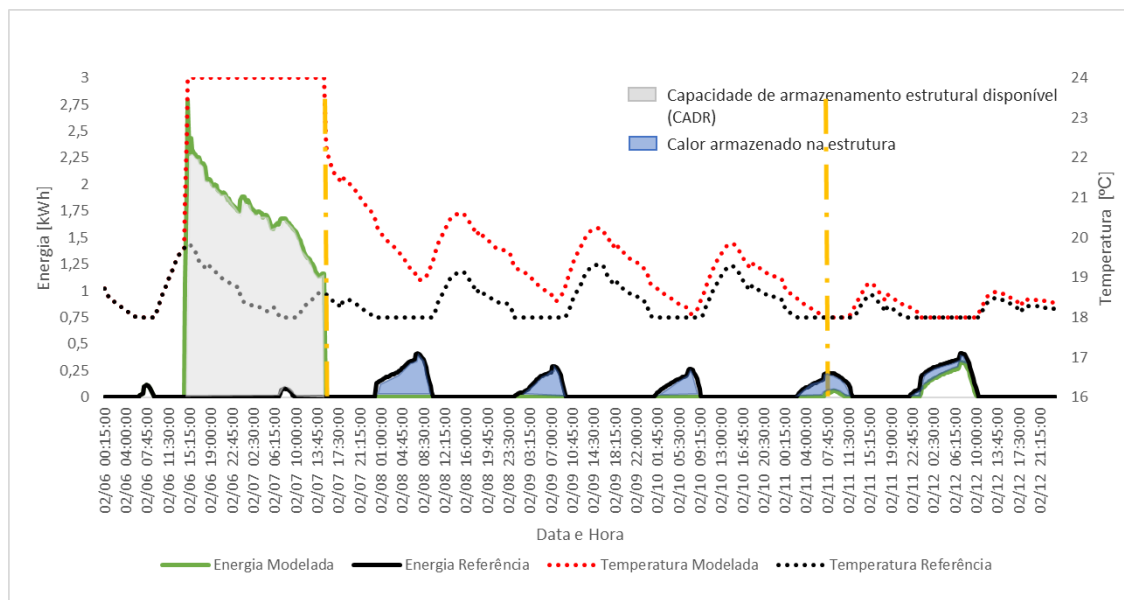


Figura 4.42 – Modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C: ETICS 8 cm EPS, Porto.

A Figura 4.42 apresenta a modelação da temperatura interior durante 24 horas a 24 °C para a solução construtiva com ETICS com 8 cm de EPS. A análise da figura indica que o aquecimento é desativado após a modelação durante 87 horas e 45 minutos (entre as 15:15 e

as 07:00 horas do dia 7 e 11 de fevereiro, respetivamente). E o aquecimento é reduzido em pelo menos 50 % em relação ao aquecimento de referência durante 105 horas e 45 minutos após a modelação (entre as 15:15 do dia 7 e as 07:00 horas do dia 9 de fevereiro, indicado na figura pelas linhas verticais a amarelo).

Através da análise da Figura 4.43 é possível constatar que a solução construtiva de ETICS com 8 cm de EPS tem valores de capacidade de armazenamento estrutural disponível entre 1,89 kWh e 172,06 kWh.

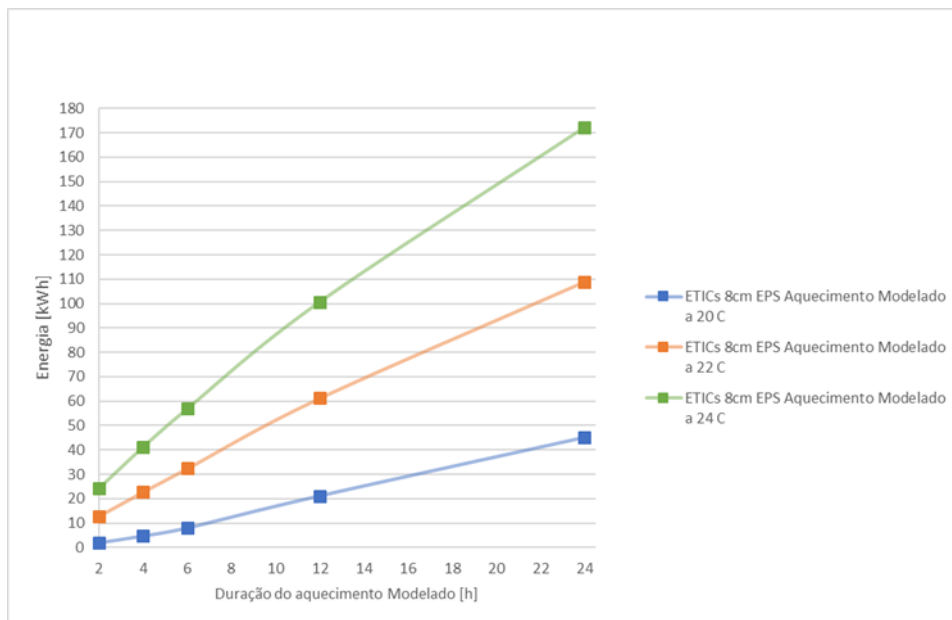


Figura 4.43 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Porto.

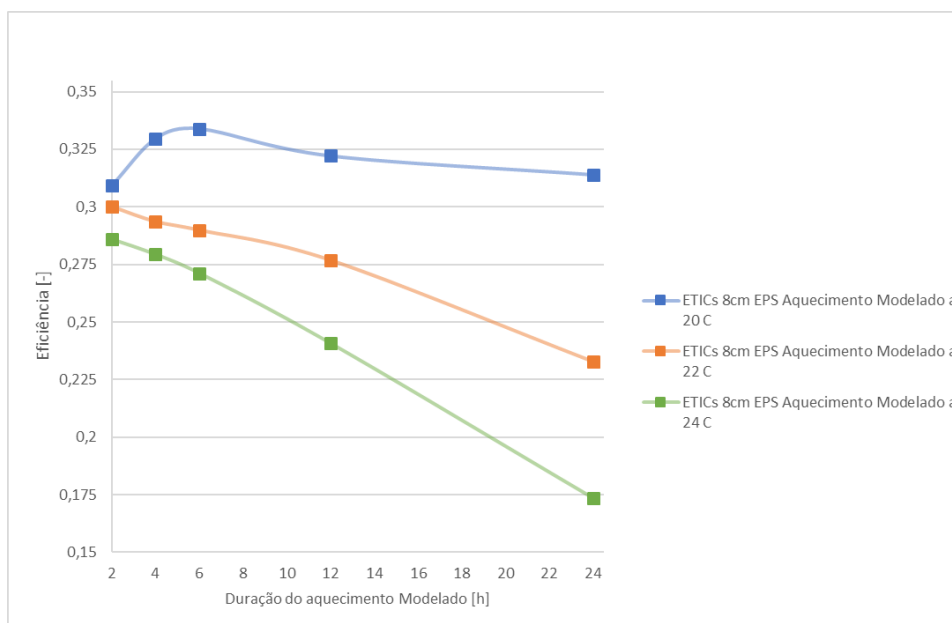


Figura 4.44 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 8 cm EPS, Porto.

A Figura 4.44 indica a eficiência do armazenamento para a solução construtiva com ETICS com 8 cm de EPS. A análise da figura revela que após a modelação do aquecimento durante 2 horas a 20 °C, 30,9 % de 1,89 kWh é armazenado sob a forma de calor na estrutura do edifício (apresentado pela área a azul na Figura 4.41). No caso da modelação do aquecimento



durante 24 horas a 24 °C, somente 17,4 % de 172 kWh da  $C_{ADR}$  é armazenado (indicado pela área a azul na Figura 4.42), e trata-se do caso menos eficiente. E o caso mais eficaz ocorre na modelação do aquecimento durante 6 horas a 20 °C, em que 33,4 % de 7,97 kWh é armazenado sob a forma de calor.

Através da análise da eficiência das soluções construtivas apresentadas na Figura 4.40 e na Figura 4.44, constata-se as modelações do aquecimento com durações superiores a 6 horas possuem valores mais baixos de eficiência. As figuras apresentam valores de eficiência do armazenamento entre 54,6 % e 17,3 %.

A Figura 4.45 apresenta os valores da capacidade de armazenamento estrutural disponível em função dos valores do calor armazenado na estrutura do edifício, em diferentes cenários de ativação do aquecimento, para a solução construtiva de paredes exteriores simples e paredes com ETICS com 8 cm de EPS na zona climática do Porto.

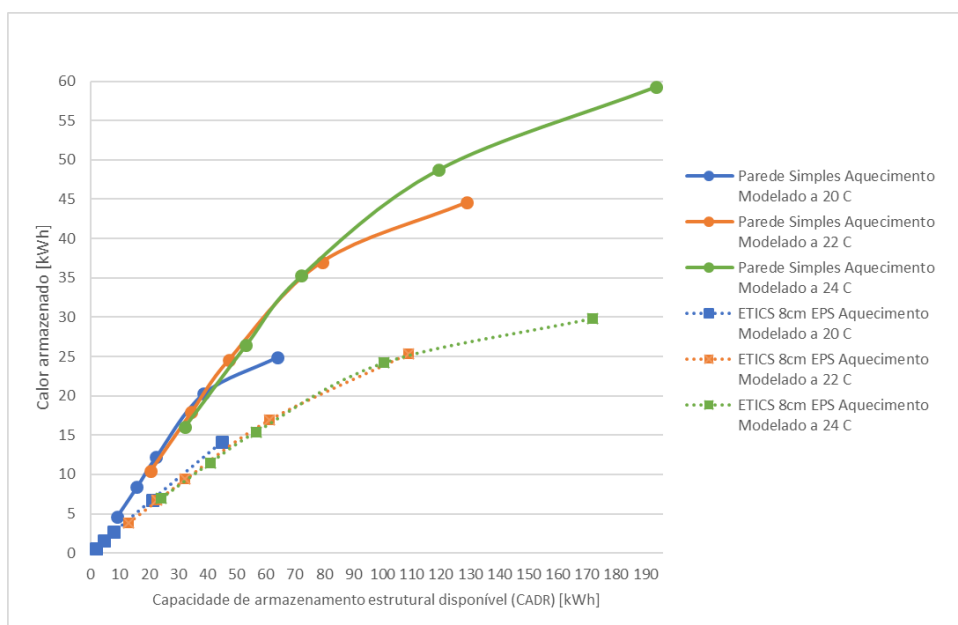


Figura 4.45 – Calor armazenado – Parede Simples e ETICS 8 cm EPS, Porto.

Através da análise da Figura 4.45 retira-se as seguintes conclusões. O caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS apresenta, nos vários cenários da modelação do aquecimento, valores de capacidade de armazenamento estrutural disponível e valores do calor armazenado menores em relação ao caso com paredes exteriores simples. O caso com paredes exteriores de ETICS com 8 cm de EPS é o caso que apresenta maior consistência na proporção de calor armazenado de acordo com o aumento da duração do aquecimento alterado, à exceção do valor da modelação com maior duração e maior temperatura de aquecimento que aponta um decréscimo no calor armazenado. Já no caso com paredes exteriores simples, ao fim de 6 horas de modelação do aquecimento, o calor armazenado diminui em relação à proporção inicial.

A Figura 4.46 apresenta o resumo da duração da redução do aquecimento de referência em mais de metade para as quatro soluções construtivas na zona climática do Porto. A duração máxima da redução do aquecimento é de 105 horas e 45 minutos para a solução construtiva com mais isolamento térmico.

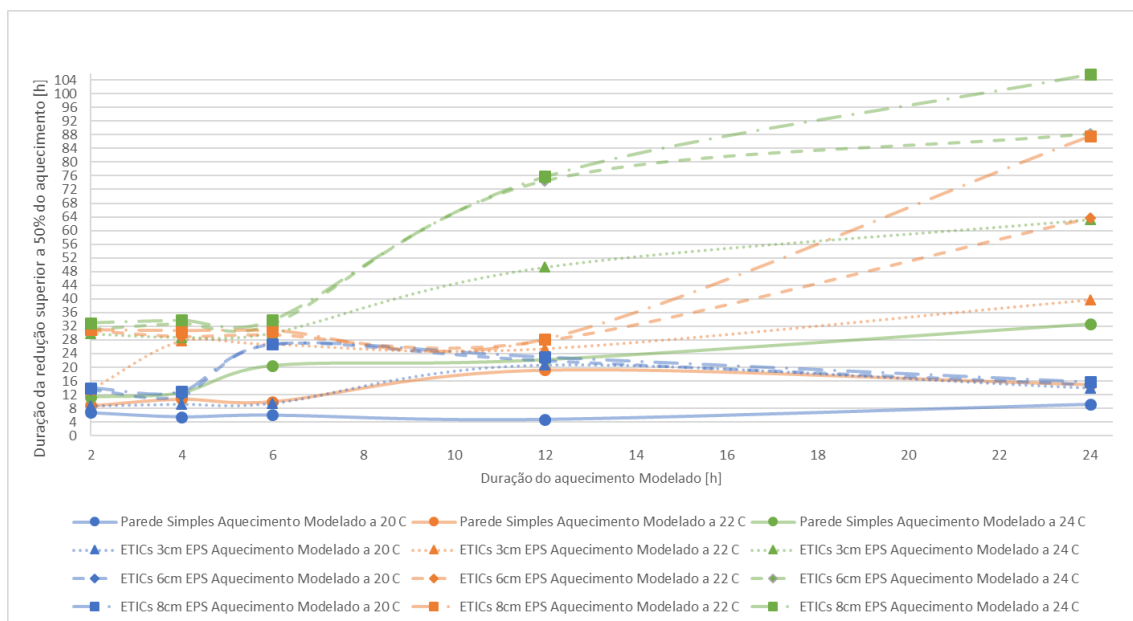


Figura 4.46 – Duração da redução do aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor no Porto.

Através da análise da Figura 4.46 confirma-se os resultados do subcapítulo 4.1 e do subcapítulo 4.2, isto é, o calor é armazenado durante mais tempo quanto maior é a quantidade de isolamento térmico.

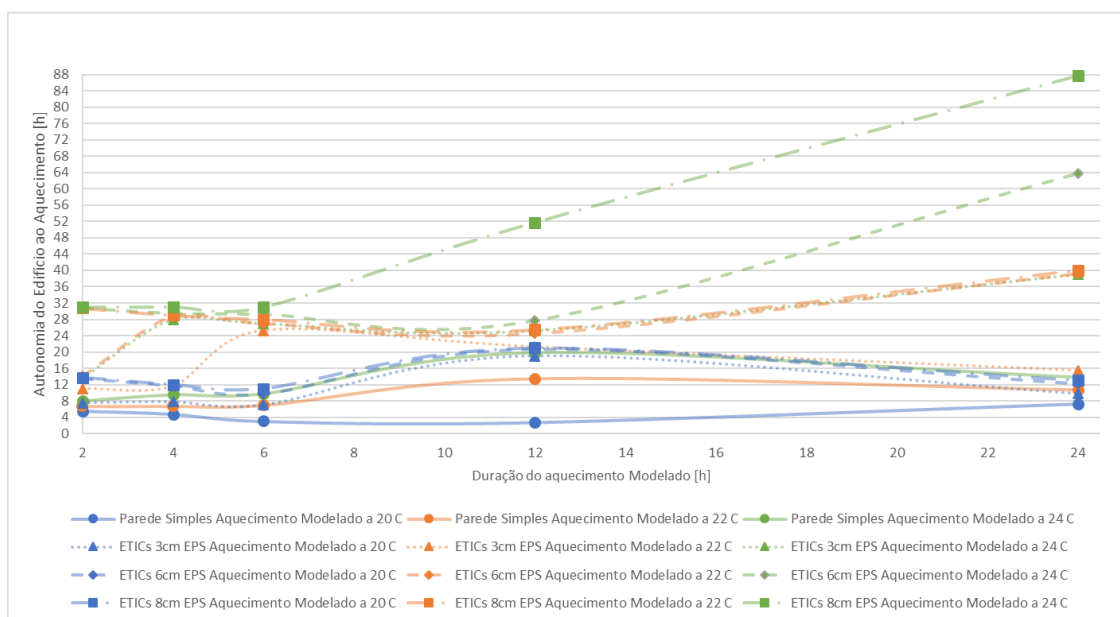


Figura 4.47 – Autonomia do edifício relativamente ao aquecimento para diferentes cenários de armazenamento de calor no Porto.

Para finalizar este subcapítulo, consta-se através da análise da Figura 4.47 que o edifício fica autónomo ao aquecimento durante um período máximo de 87 horas e 45 minutos (um pouco mais de 3 dias e meio), para a solução construtiva com mais isolamento térmico e até 19 horas e 45 minutos para a solução construtiva com paredes envolventes simples. Os resultados ilustrados na Figura 4.47 são idênticos aos resultados obtidos na zona climática de Lisboa devido às semelhanças nas temperaturas nos dias escolhidos para representar a estação de aquecimento (apresentado na Figura 4.23 do subcapítulo 4.1).

#### 4.4. Gestão da Energia Final de acordo com a Tarifa Energética

No presente subcapítulo analisa-se a gestão temporal da energia final solicitada pelo aquecimento no caso de estudo, em função da tarifa bi-horária diária em vigor. As horas de vazio são entre as 22:00 e as 8:00 horas com um custo de 0,1014 €/kWh e as restantes horas fora de vazio, entre as 8:00 e as 22:00 horas, têm um custo de 0,1942 €/kWh. Os valores são provenientes do portal da ERSE para uma tarifa BTN até 20,7 kVA [1]. Assim, de modo a evitar as horas de maior custo, torna-se necessário gerir estrategicamente a energia solicitada pelo aquecimento, sem prejudicar a temperatura de conforto.

A Figura 4.48 apresenta o consumo de energia de um dia representativo da estação de aquecimento em Bragança (6 de fevereiro) com a solução construtiva com paredes exteriores simples. Através da análise da figura verifica-se que a carga energética entre as 8:00 e as 22:00 horas apresenta potencial para ser desviada para as horas de vazio.

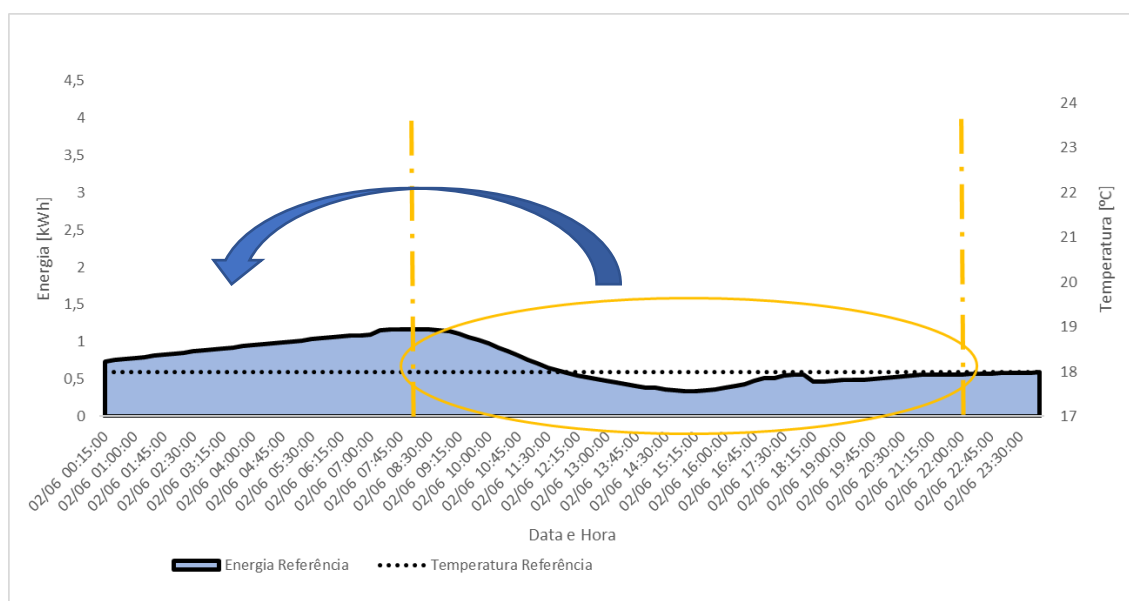


Figura 4.48 – Energia para o aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança.

De modo a identificar a melhor estratégia de desvio de carga são testadas 12 simulações. A solução ótima é a solução que apresenta menor custo diário através do pré-aquecimento do edifício nas horas de vazio, de modo a diminuir o consumo de energia nas horas de ponta.

A Figura 4.49 apresenta a solução ótima encontrada. A análise da figura indica que o pré-aquecimento ocorre durante 4 horas a 24 °C (com o aumento gradual da temperatura durante 45 minutos antes do pré-aquecimento) entre as 03:15 e as 08:00 horas.

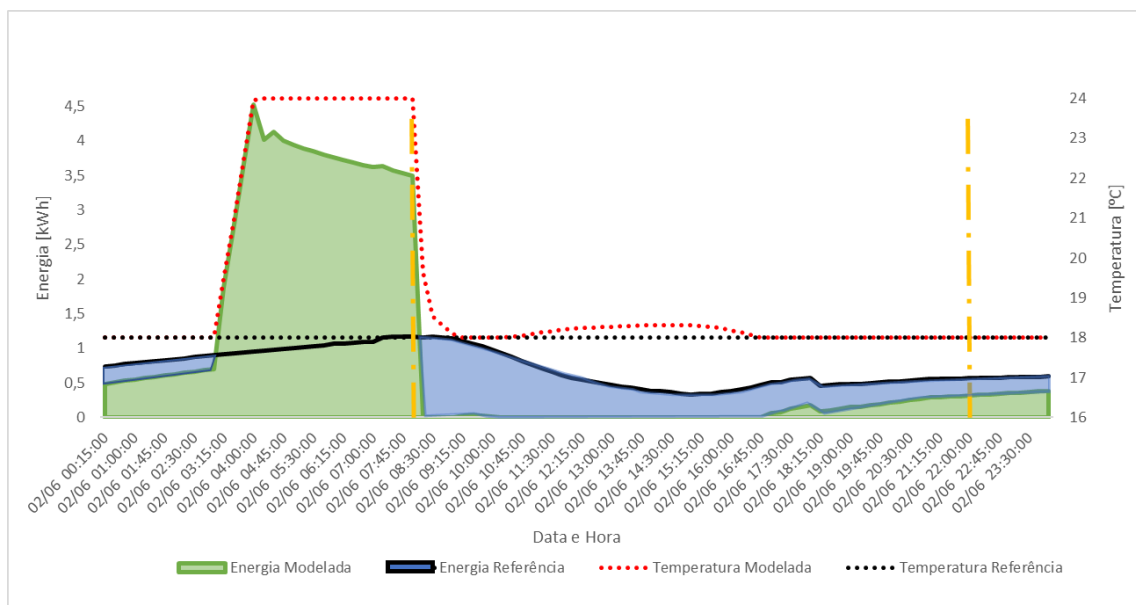


Figura 4.49 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança.

A análise da Figura 4.50 indica que através da gestão eficiente do aquecimento neste caso prático, o valor inicial de € 10,11 diário, gastos em aquecimento para manter a temperatura mínima de 18 °C, é reduzido em 8,61 % e passa para € 9,24.

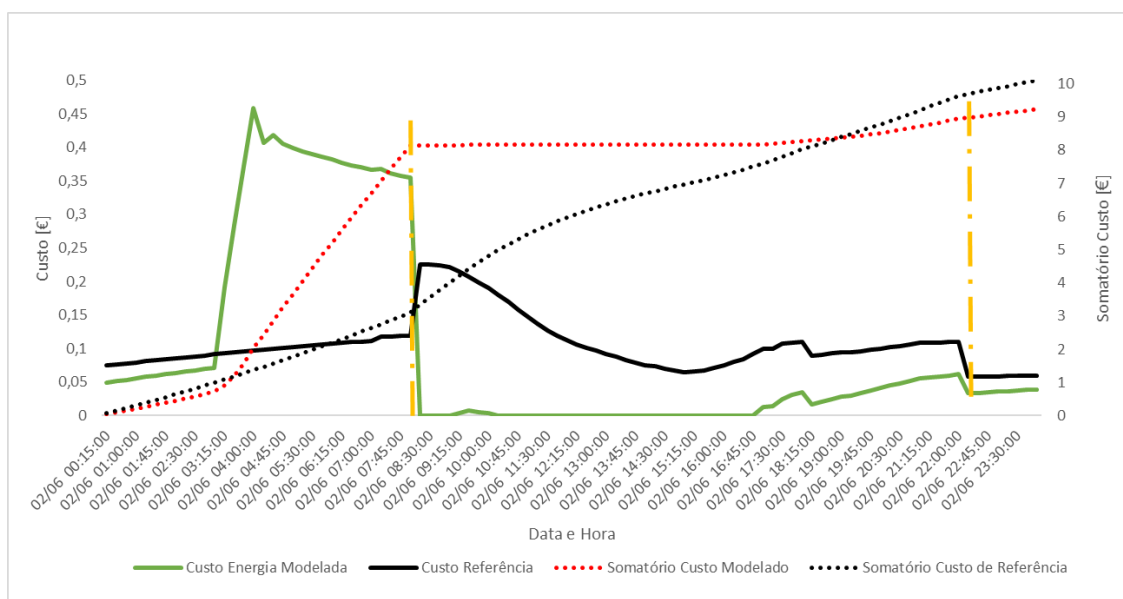


Figura 4.50 – Custo do aquecimento do edifício com paredes simples num dia da estação de aquecimento em Bragança.

De acordo com o fator de flexibilidade proposto por Le Dréau *et al.* [4], descrito no subcapítulo 2.4, este caso apresenta um fator de 0,91 (em que 1 indica que o aquecimento não é utilizado em períodos de preço elevado).

Realiza-se o mesmo procedimento para a solução construtiva de ETICS com 3 cm de EPS. Deste modo, são testadas 9 simulações com o fim de identificar a melhor estratégia de desvio de carga com menor custo diário.

A Figura 4.51 indica a solução ótima de pré-aquecimento. Através da análise da figura constata-se que o aquecimento ótimo ocorre quando a temperatura é modelada durante 1 hora a 24 °C.

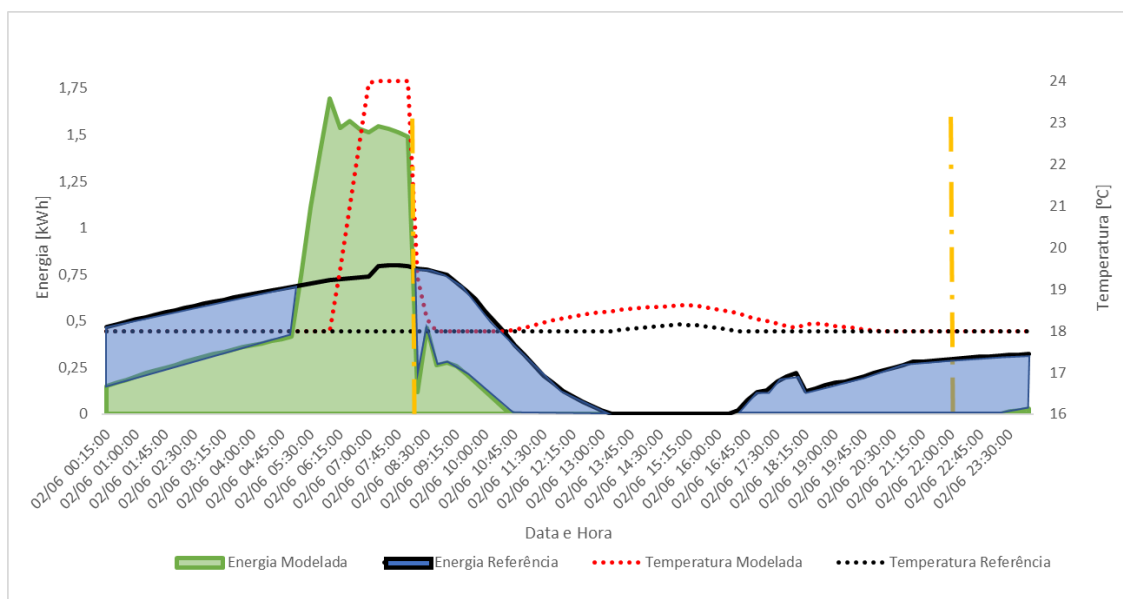


Figura 4.51 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 3 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

A análise da Figura 4.52 indica que a gestão eficiente do aquecimento neste caso prático é responsável por uma diminuição em 7,69 % do custo, em que o valor inicial diário de € 4,81 é reduzido para € 4,44. Obtém-se assim um fator de flexibilidade de 0,92.

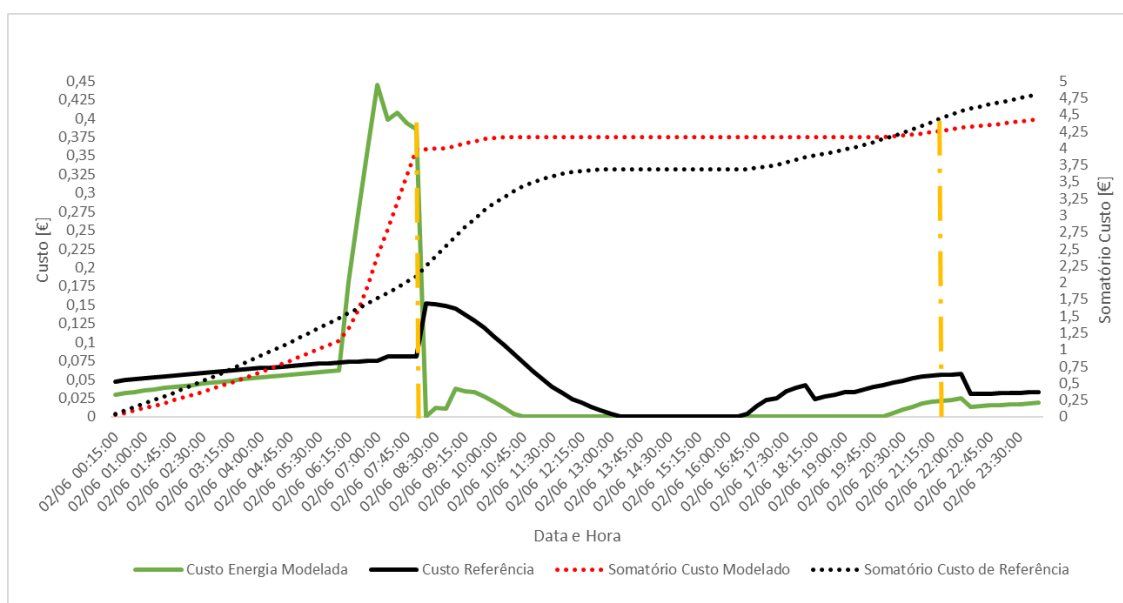


Figura 4.52 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 3 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

Já no caso da solução construtiva de ETICS com 6 cm de EPS, são testadas 9 simulações com o fim de identificar a melhor estratégia de desvio de carga com menor custo diário.

A análise da Figura 4.53 revela que o aquecimento ótimo é atingindo quando o aquecimento é ativado durante 1 hora a 22 °C durante as horas de vazio.

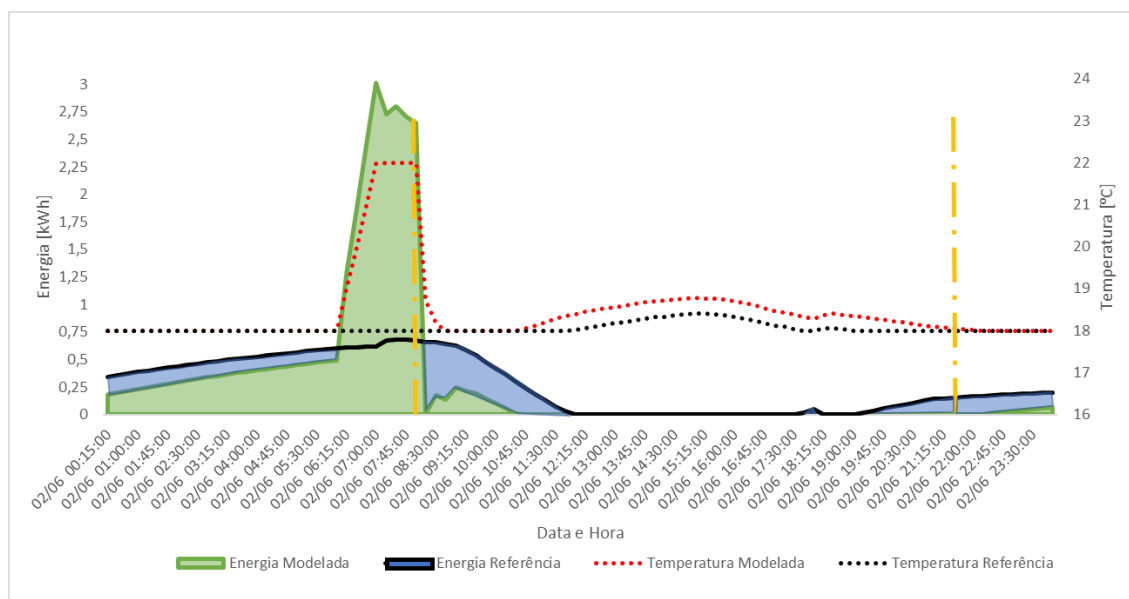


Figura 4.53 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 6 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

Através da análise da Figura 4.54 constata-se que o custo do aquecimento consumido no dia em estudo é reduzido de € 3,26 para € 3,11, trata-se de uma redução do custo em 4,6 %. Obtém-se assim um fator de flexibilidade de 0,91.

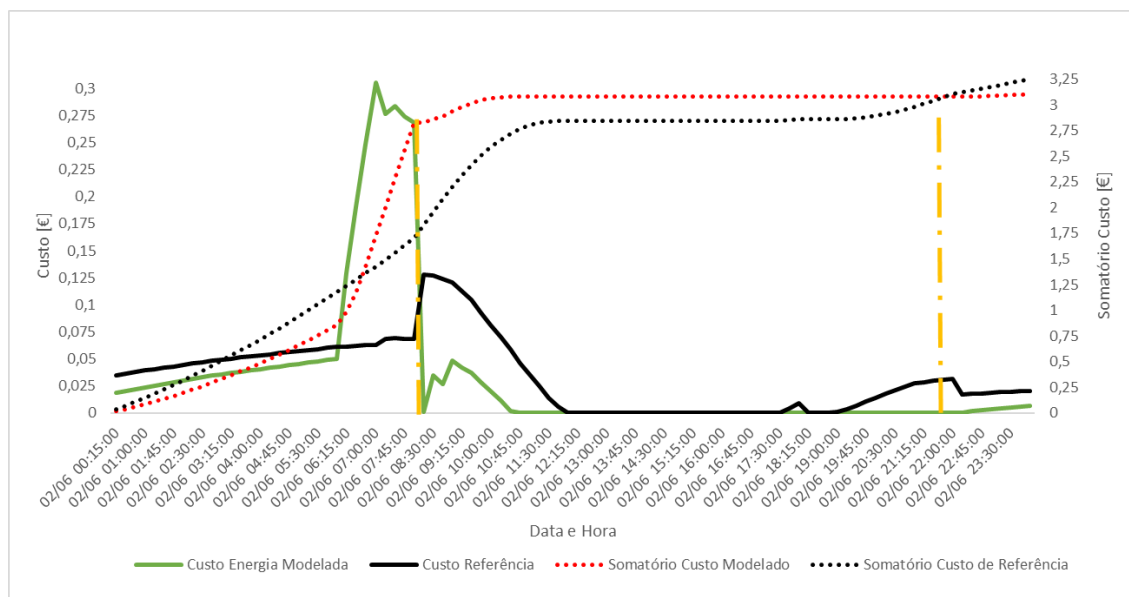


Figura 4.54 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 6 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

Para finalizar, são testadas 6 simulações com o fim de identificar a melhor estratégia de desvio de carga com menor custo diário para a solução construtiva de ETICS com 8 cm de EPS.

A Figura 4.55 ilustra a solução ótima da solução construtiva de ETICS com 8 cm de EPS, que ocorre quando o aquecimento é modelado durante 2 horas a 20 °C.

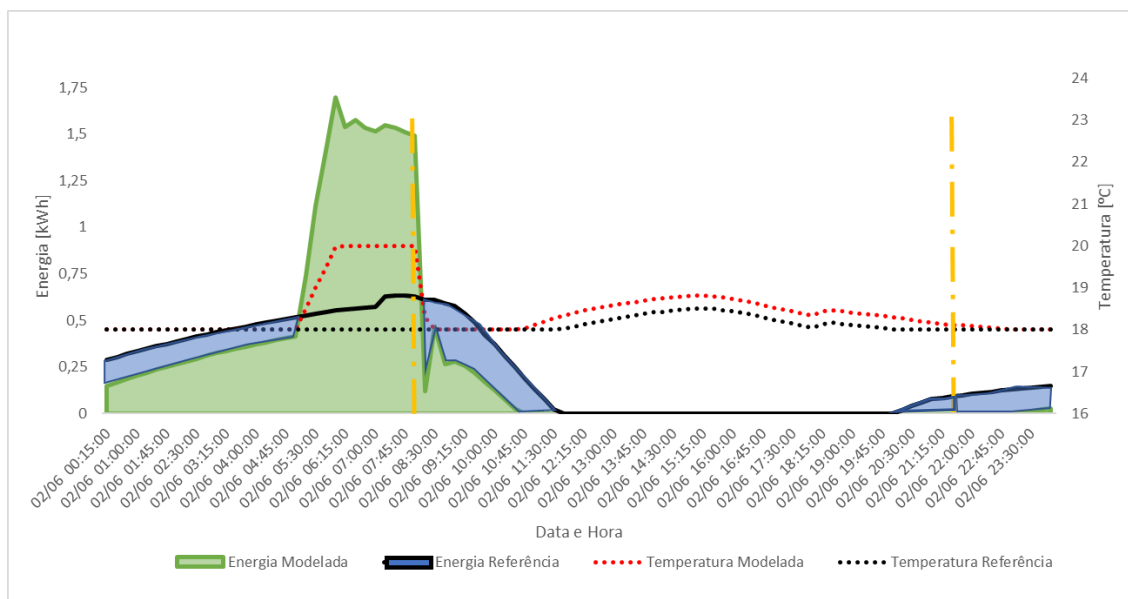


Figura 4.55 – Flexibilidade do aquecimento do edifício com ETICS com 8 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

Através da análise da Figura 4.56 constata-se que a diferença de custos entre a otimização do aquecimento e o aquecimento de referência é insignificante. Pois, o custo inicial é de € 2,76 e o custo otimizado é de € 2,74, com uma diferença aproximada de 1 %. Obtém-se assim um fator de flexibilidade de 0,84.

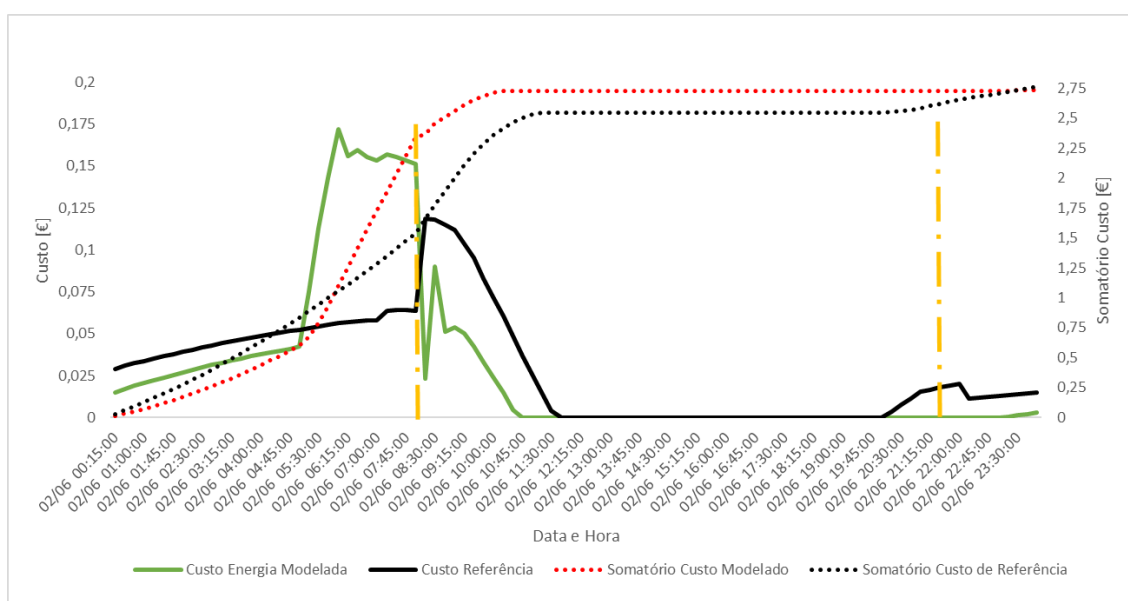


Figura 4.56 – Custo do aquecimento do edifício com ETICS com 8 cm de EPS num dia da estação de aquecimento em Bragança.

A Tabela 4.4 apresenta o resumo dos resultados do fator de flexibilidade calculado para o dia 6 de fevereiro. Através da análise da tabela verifica-se que o valor do fator de flexibilidade em cada solução construtiva é próximo de 1. Deste modo, é possível afirmar que para o dia 6 de fevereiro a energia útil nas horas de ponta é em grande parte desviada para as horas de vazio. No entanto, a solução construtiva de ETICS de 8 cm de EPS é associada ao valor mais baixo do fator de flexibilidade quando comparado com as outras soluções construtivas, uma vez que é o caso que apresenta menores necessidades energéticas.

Tabela 4.4 – Fator de flexibilidade para o dia 6 de fevereiro.

Solução Construtiva	Solução ótima do pré-aquecimento	Custo inicial	Redução do custo inicial	Fator de flexibilidade
Parede Simples	4 horas a 24 °C	10,11 €	8,6 %	0,91
ETICS 3 cm EPS	1 horas a 24 °C	4,81 €	7,7 %	0,92
ETICS 6 cm EPS	1 horas a 22 °C	3,26 €	4,6 %	0,91
ETICS 8 cm EPS	2 horas a 20 °C	2,76 €	1,0 %	0,84

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos após a utilização das medidas de flexibilidade energética apresentadas na Figura 4.49, na Figura 4.51, na Figura 4.53 e na Figura 4.55, mas, agora aplicadas ao dia 7 de fevereiro. Este dia apresenta mais necessidades de aquecimento relativamente ao dia 6 de fevereiro (apresentado na Figura 4.25 do subcapítulo 4.2).

Tabela 4.5 – Fator de flexibilidade para o dia 7 de fevereiro.

Solução Construtiva	Solução do pré-aquecimento	Custo inicial	Redução do custo inicial	Fator de flexibilidade
Parede Simples	4 horas a 24 °C	13,36 €	6,2 %	0,60
ETICS 3 cm EPS	1 horas a 24 °C	8,19 €	11,2 %	0,43
ETICS 6 cm EPS	1 horas a 22 °C	6,40 €	14,2 %	0,37
ETICS 8 cm EPS	2 horas a 20 °C	5,72 €	14,5 %	0,30

Através da análise da Tabela 4.5 constata-se que os valores do fator de flexibilidade obtidos no dia 7 de fevereiro são muito inferiores quando comparados com os valores obtidos para o dia 6 de fevereiro (apresentado na Tabela 4.4). Com a análise destes resultados é possível concluir que o potencial da flexibilidade energética depende das condições climáticas e das características termofísicas dos edifícios e que a sua implementação prática pode carecer de modelos de controlo preditivo (MPC) específicos.

De modo a identificar a melhor estratégia de desvio de carga para o dia 7 de fevereiro são testadas no total 36 simulações. A solução ótima é a solução que apresenta menor custo diário através do pré-aquecimento do edifício nas horas de vazio, de modo a diminuir o consumo de energia nas horas de ponta.

A Tabela 4.6 apresenta os valores do fator de flexibilidade otimizados para o dia 7 de fevereiro. A análise dos valores da tabela permite constatar que à exceção da solução construtiva com paredes exteriores simples as soluções construtivas verificam um valor de fator de flexibilidade próximo de 1. A solução construtiva sem isolamento térmico necessita de um período maior de pré-aquecimento durante as horas de vazio para diminuir o custo nas restantes horas. No entanto, não consegue armazenar energia suficiente sob a forma de calor na sua estrutura de modo a garantir o menor consumo possível nas horas de ponta.

Tabela 4.6 – Fator de flexibilidade otimizado para o dia 7 de fevereiro.

Solução Construtiva	Solução ótima do pré-aquecimento	Custo inicial	Redução do custo inicial	Fator de flexibilidade
Parede Simples	5 horas a 24 °C	13,36 €	6,3 %	0,69
ETICS 3 cm EPS	3 horas a 24 °C	8,19 €	23,4 %	0,89
ETICS 6 cm EPS	2 horas a 24 °C	6,40 €	30,7 %	0,92
ETICS 8 cm EPS	2 horas a 24 °C	5,72 €	32,0 %	0,98



No presente subcapítulo, conclui-se que o aumento da quantidade de isolamento térmico nas envolventes do edifício provoca uma diminuição do custo diário do aquecimento, desde da solução construtiva de paredes simples (Figura 4.50) até ao caso de ETICS com 8 cm de EPS (Figura 4.56). Pois existem menores necessidades de aquecimento com o aumento isolamento térmico. Deste modo, o edifício sem isolamento térmico consegue desviar grandes quantidades de energia térmica nas horas de vazio. Contudo, não consegue garantir o armazenamento de calor suficiente para suportar as necessidades de aquecimento nas horas de ponta. Assim, de acordo com as soluções construtivas e as condições atmosféricas, pode ser necessário implementar estratégias de controlo diferentes, como sejam do tipo MPC, de modo a equilibrar a flexibilidade energética.



## 5. Conclusões

Neste trabalho, um edifício residencial, sujeito a quatro soluções construtivas em três zonas climáticas de Portugal, é estudado com o objetivo de analisar a sua flexibilidade energética. Com recurso à ferramenta *EnergyPlus*, simulou-se o aquecimento do edifício habitacional submetido a diferentes cenários de armazenamento de energia térmica na sua estrutura.

Esta dissertação define a flexibilidade energética de um edifício como a capacidade de desviar a energia elétrica de um perfil de consumo de referência (aquecimento), sem afetar o conforto térmico durante o processo, e pode ser gerida de modo a minimizar os custos do consumo do aquecimento. Neste trabalho, o potencial da flexibilidade energética em edifícios é testado com base nos valores da capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência de armazenamento na presença da alteração da temperatura de conforto e da autonomia do edifício relativamente ao aquecimento.

Os valores obtidos na capacidade de armazenamento estrutural disponível e na autonomia do edifício permitem constatar que no caso com maior quantidade de isolamento térmico verifica não só menores necessidades de aquecimento, como também, menor quantidade de energia térmica armazenada na sua estrutura. No entanto, a libertação do calor da sua estrutura é lenta e deste modo, é a solução que mais autonomia apresenta relativamente ao aquecimento.

Por outro lado, a análise dos resultados obtidos na eficiência do armazenamento de energia sob a forma de calor na estrutura de edifícios, permite constatar que a eficiência diminui com o aumento da duração e da temperatura do aquecimento alterado. Pois, este indicador proposto por Reynders *et al.* [15] resulta da ativação da capacidade de armazenamento com o aumento da temperatura interior de referência, assim, as perdas por transmissão e ventilação aumentam. Os resultados indicam que as melhores soluções de pré-aquecimento ocorrem durante curtos períodos de tempo (até 6 horas), e evitam elevadas perdas térmicas assim como não provocam o desconforto dos ocupantes.

O sistema de aquecimento com ar condicionado, que é utilizado nas simulações desta dissertação, atua principalmente sobre o ar, ao contrário do que acontece com outros equipamentos de climatização, facto que provoca rápidas flutuações da temperatura na presença de perdas por transmissão e ventilação. No caso do aquecimento com piso radiante, que ativa diretamente a inércia térmica, a libertação de calor é gradual e o ar aquece mais lentamente e tem menores perdas térmicas. Por este motivo, os valores de eficiência do armazenamento de calor obtidos neste trabalho, entre 23% e 63,9 % para modelações até 12 horas, são inferiores aos obtidos por Reynders *et al.* [15], onde se verificam valores entre 60 % e 100 % para o mesmo período de avaliação de 12 horas.

No caso da análise prática da flexibilidade energética, que é avaliada através da gestão da energia consumida pelo aquecimento desviada ao longo do tempo no encontro da tarifa elétrica mais baixa, obteve-se resultados positivos, com reduções de custo entre 1 e 30 % em relação à situação de referência. Constata-se que o edifício sem isolamento térmico consegue desviar maiores quantidades de energia térmica nas horas de preço mais baixo devido as suas maiores necessidades energéticas. Contudo, isto não garante o armazenamento de calor suficiente para diminuir as necessidades de aquecimento nas horas de preço elevado. Assim, o potencial da flexibilidade energética depende das condições climáticas e das características termofísicas dos edifícios, e que a sua implementação prática pode carecer de modelos de controlo preditivo (MPC) específicos.

Por fim, a capacidade de armazenamento estrutural disponível e a eficiência do armazenamento de calor na estrutura de edifícios são indicadores que permitem quantificar a flexibilidade. Estes indicadores estão em função das propriedades térmicas do edifício, especialmente em função da quantidade de isolamento térmico na estrutura do edifício, e também dependem dos equipamentos de climatização, dos requisitos de conforto, das condições atmosféricas e do comportamento dos ocupantes, por isso, não são constantes.

### **5.1. Desenvolvimentos futuros**

Em Portugal, não é habitual deixar o aquecimento ligado nas habitações quando há períodos de desocupação ou de maior calor, apenas é ativado quando o utilizador sente desconforto térmico. Seria interessante por isso avaliar a aceitação dos utentes, de modo a facultar a ligação do aquecimento através de um sinal externo e complementar os resultados desta dissertação.

Outro estudo complementar sugerido prende-se com a introdução no balanço energético de sistemas de energias renováveis ao fim de reduzir o desfasamento entre produção e consumo.

## Bibliografia

- [1] ERSE, "Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos", 2009. Disponível em: [www.erse.pt](http://www.erse.pt). [Acedido: 09-Mar-2017].
- [2] S. Jensen e A. Marszal-Pomianowska, "IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings", *Aalborg University, Denmark*, 2016. Disponível em: [http://vbn.aau.dk/files/233817779/paper\\_325.pdf](http://vbn.aau.dk/files/233817779/paper_325.pdf). [Acedido: 03-Fev-2017].
- [3] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives - Scenarios & Strategies to 2050", *Paris Cedex, France*, 2010. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/etp2010.pdf>. [Acedido: 12-Abr-2017].
- [4] J. Le Dréau e P. Heiselberg, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass", *Energy*, vol. 111, n. Elsevier Ltd, pp. 991–1002, 2016.
- [5] Futur Eng, "Inércia Térmica". Disponível em: [www.futur-eng.pt/inercia-termica](http://www.futur-eng.pt/inercia-termica). [Acedido: 22-Nov-2016].
- [6] Direção Geral de Energia e Geologia, "Caraterização Energética Nacional", 2012. Disponível em: [www.dgeg.pt](http://www.dgeg.pt). [Acedido: 12-Abr-2017].
- [7] Projecto BUILD UP SKILLS PORTUGAL, "Formação Para As Renováveis E Eficiência Energética No Sector Da Construção", 2012.
- [8] ADENE - Agência para a Energia, "Certificação Energética e Ar Interior - Edifícios", 2017. Disponível em: [www.adene.pt](http://www.adene.pt). [Acedido: 26-Mai-2017].
- [9] EU-SILC, "Estatística do Rendimento e das Condições de Vida na União Europeia", 2010. Disponível em: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Income\\_distribution\\_statistics/pt](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Income_distribution_statistics/pt). [Acedido: 23-Mai-2017].
- [10] H. Gonçalves e L. Brotas, *A Norma Passivhaus em Climas Quentes da Europa: Directrizes de Projecto para Casas Confortáveis de Baixo Consumo Energético*. INETI, Lisboa, Portugal, 2007.
- [11] L. Tirone e K. Nunes, *Construção Sustentável*. Sintra, Portugal, 2017.
- [12] Energy in Buildings and Communities, "The EBC Research Strategy", 2013. Disponível em: [www.iea-ebc.org](http://www.iea-ebc.org). [Acedido: 15-Out-2016].
- [13] W. Cardinaels e I. Borremans, "Demand response for families -LINEAR Final Report", *EnergyVille, Genk*, 2014.
- [14] A. M. Rodrigues, A. Canha da Piedade, e A. M. Braga, *Térmica de Edifícios*, ORION. Amadora, Portugal, 2009.
- [15] G. Reynders, J. Diriken, e D. Saelens, "A generic quantification method for the active demand response potential of structural storage in buildings", *14th Int. Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, 2015.
- [16] J. Neymark e R. Judkoff, "International Energy Agency Building Energy Simulation Test and diagnostic method (IEA BESTEST)", Colorado, USA, 2008.
- [17] U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "EnergyPlus". 2017.
- [18] R. Henninger e M. Witte, "EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007", Washington, D.C., USA, 2010.
- [19] C. A. Pina dos Santos e L. Matias, *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios - ITE 50*. Lisboa, 2006.
- [20] F. M. A. Henriques, *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. 2016.
- [21] Portaria n.º 349-B/2013. D.R. n.º 232, Suplemento, Série I de 2013-11-29.
- [22] Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. D.R. n.º 234, 3.º Suplemento, Série II de 2013-12-03.
- [23] Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Decreto-Lei n.º 118/2013. D.R. n.º 159, Série I, 2013-08-20.
- [24] ASHRAE, "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers", 2017. Disponível em: [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org). [Acedido: 12-Mai-2017].



## Anexo A – Eficiência do Armazenamento e Capacidade de Armazenamento Estrutural Disponível

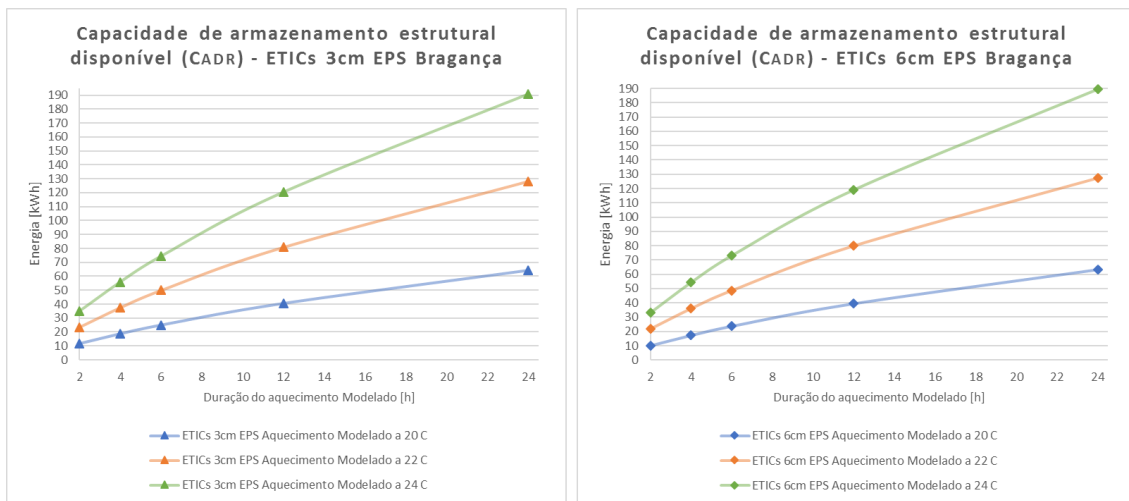


Figura A.1 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível ( $C_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Bragança.

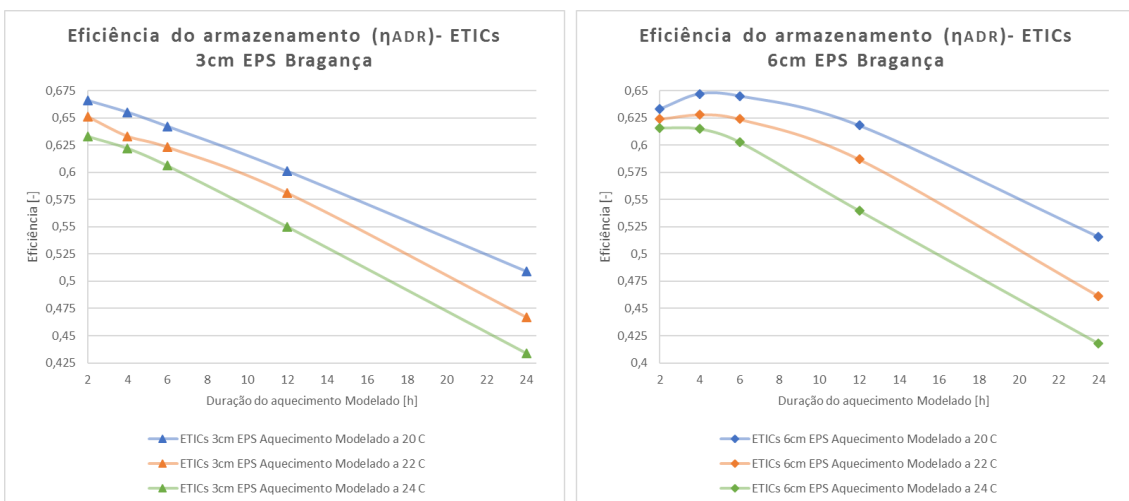


Figura A.2 – Eficiência do armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Bragança.

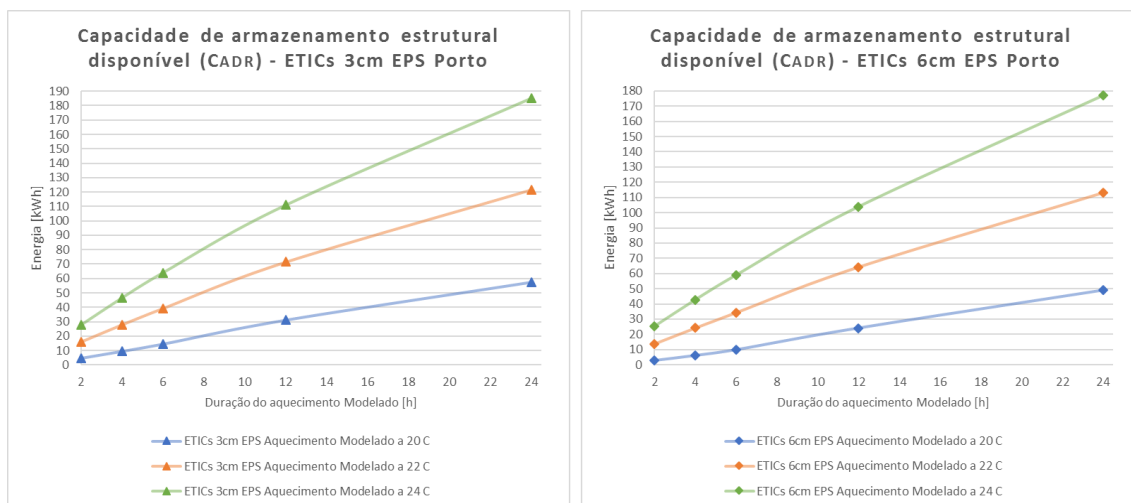


Figura A.3 – Capacidade de armazenamento estrutural disponível (C<sub>ADR</sub>) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Porto.

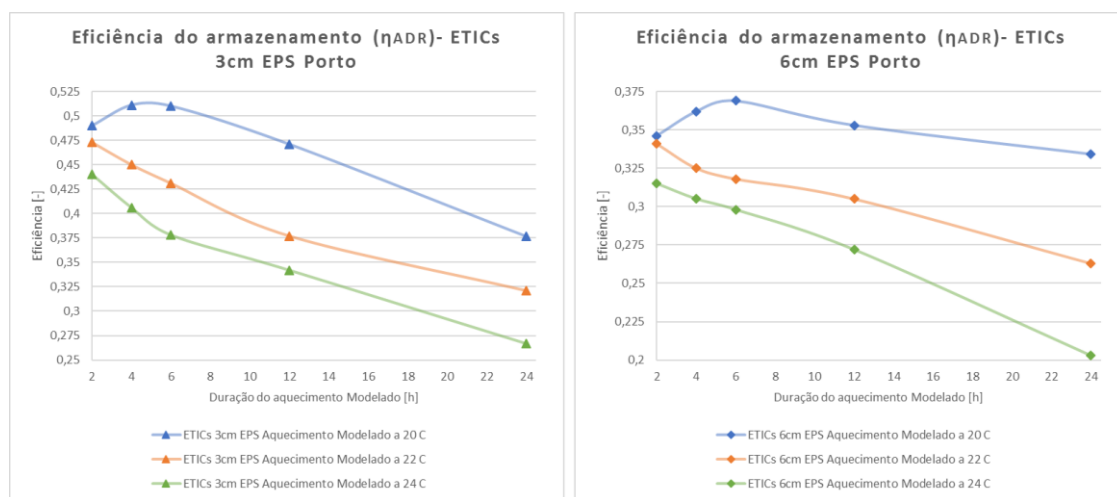


Figura A.4 – Eficiência do armazenamento (η<sub>ADR</sub>) – ETICS 3 cm e 6 cm EPS, Porto.



## Anexo B – Gestão da Energia Útil de acordo com a Tarifa Energética

Tabela B.1 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, Parede Simples.

Duração do pré-aquecimento	Custo dia 6 fevereiro [€]	Custo dia 7 fevereiro [€]
2 horas a 20 °C	9,80	13,09
2 horas a 24 °C	9,25	12,71
4 horas a 20 °C	9,76	13,07
4 horas a 24 °C	<b>9,24</b>	12,53
5 horas a 22 °C	9,36	12,87
5 horas a 24 °C	9,58	<b>12,51</b>
6 horas a 20 °C	9,77	13,12
6 horas a 24 °C	10,04	12,54
8 horas a 20 °C	9,83	13,22
8 horas a 24 °C	11,10	12,94
9 horas a 20 °C	9,88	13,28
9 horas a 24 °C	11,70	13,15

Tabela B.2 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 3 cm de EPS.

Duração do pré-aquecimento	Custo dia 6 fevereiro [€]	Custo dia 7 fevereiro [€]
1 horas a 24 °C	<b>4,44</b>	7,27
2 horas a 20 °C	4,61	7,82
2 horas a 22 °C	4,48	7,29
2 horas a 24 °C	4,82	6,62
3 horas a 20 °C	4,59	7,71
3 horas a 22 °C	4,63	6,95
3 horas a 24 °C	5,53	<b>6,27</b>
4 horas a 20 °C	4,60	7,61
4 horas a 24 °C	6,25	6,37

Tabela B.3 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 6 cm de EPS.

Duração do pré-aquecimento	Custo dia 6 fevereiro [€]	Custo dia 7 fevereiro [€]
1 horas a 20 °C	3,15	6,01
1 horas a 22 °C	<b>3,11</b>	5,49
1 horas a 24 °C	3,33	4,89
2 horas a 20 °C	3,15	5,79
2 horas a 22 °C	3,37	4,91
2 horas a 24 °C	4,10	<b>4,43</b>
3 horas a 20 °C	3,22	5,55
3 horas a 24 °C	4,88	4,79
4 horas a 20 °C	3,29	5,36

Tabela B.4 – Custo diário da tarifa energética para diferentes cenários de pré-aquecimento – dia 6 e 7 de fevereiro, Bragança, ETICS com 8 cm de EPS.

Duração do pré-aquecimento	Custo dia 6 fevereiro [€]	Custo dia 7 fevereiro [€]
1 horas a 24 °C	3,07	3,97
2 horas a 20 °C	<b>2,74</b>	4,89
2 horas a 22 °C	3,09	4,01
2 horas a 24 °C	3,87	<b>3,86</b>
4 horas a 20 °C	2,99	4,51
4 horas a 24 °C	5,37	5,21